

**Mendelova Univerzita v Brně**

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Stanovení pružnostních a pevnostních  
charakteristik dřeva v čerstvém stavu**

Bakalářská práce

2016/2017

Robin Bielesz

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem Bakalářskou práci na téma: Stanovení pružnostních a pevnostních charakteristik dřeva v čerstvém stavu zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně, dne:..... podpis studenta:

### **Poděkování:**

Tímto bych chtěl předem poděkovat všem, kteří mi byli jakkoliv nápomocni během celé doby mého studia na této škole. Hlavně mé rodině a přátelům, kteří mě během studia podporovali. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se nějakým způsobem podíleli na vzniku této bakalářské práce. Především vedoucímu práce, panu Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za jeho cenné rady a panu Ing. Radimu Rouskovi a Ondřeji Jakešovi za pomoc při přípravě zkoumaných vzorků.

## **Abstrakt**

Název práce: Stanovení pružnostních a pevnostních charakteristik dřeva v čerstvém stavu

Autor: Bielez Robin

Tato práce se zabývá zkoumáním pružnostních a pevnostních charakteristik čerstvě skáceného dřeva. Konkrétně se jednalo o dřevo stromu javor mléč (*Acer platanoides* L.). K dispozici byl celý kmen jednoho stromu z urbanizovaného prostředí, u kterého byly naznačeno natočení stromu vůči světovým stranám. Po výrobě jednotlivých vzorků o rozměrech 20 × 20 × 30 mm bylo nutností u každého vzorku uvést jeho dřívější polohu v kmeni (výška, poloha od středu kmene, umístění vůči světové straně). Konečný experiment byl prováděn na zkušebním stroji Zwick 050, vzorky zde byly zkoušeny destruktivní metodou na tlak podél vláken. Výsledky byly poté dále zpracovány pomocí programu testXpert od společnosti Zwick. Výsledkem je tedy zjištění, jak se mění hustota, pevnostní a pružnostní charakteristiky v jednotlivých místech kmene.

Klíčová slova: čerstvé dřevo, hustota dřeva, javor, modul pružnosti, pevnost v tlaku

## **Abstract**

Title: Determination of elasticity and strength characteristics of fresh wood

Author: Bielez Robin

This thesis examines the elasticity and strength characteristics of freshly felled timber. Specifically, the wood of Norway maple (*Acer platanoides* L.). There was a whole trunk of one tree from urbanized environment, which were marked the world sides. After production of individual samples with dimension od 20 × 20 × 30 mm it has been necessary for each sample to describe his former position in the trunk (height, location in the trunk, location of the world side). The final experiment was performed on the testing machine Zwick 050, samples were tested by destructive method by pressure along the fibers. Then the results were processed using program testXpert from Zwick. The result is how to change the density, strength and elasticity characteristics in different locations in tree trunk.

Keywords: compressive strength, density of wood, fresh wood, maple, modulus of elasticity

# Obsah

1. Úvod.....	- 1 -
2. Cíl práce.....	- 2 -
3. Literární přehled .....	- 3 -
3.1. Dendrologický popis .....	- 3 -
3.1.1. Javor (Acer).....	- 3 -
3.1.2. Javor mléč (Acer Platanoides L.) .....	- 3 -
3.1.3. Makroskopická stavba dřeva javoru.....	- 4 -
3.1.4. Mikroskopická stavba dřeva javoru .....	- 5 -
3.2. Hustota dřeva .....	- 6 -
3.2.1. Hustota dřevní substance.....	- 7 -
3.2.2. Hustota dřeva v závislosti na vlhkosti.....	- 8 -
3.2.3. Variabilita hustoty dřeva .....	- 8 -
3.3. Mechanické vlastnosti dřeva .....	- 9 -
3.3.1. Anizotropie mechanických vlastností .....	- 10 -
3.3.2. Mechanické namáhání.....	- 11 -
3.3.3. Napětí .....	- 11 -
3.3.4. Deformace .....	- 12 -
3.3.5. Vztah mezi napětím a deformací.....	- 12 -
3.4. Pružnost dřeva.....	- 14 -
3.4.1. Modul pružnosti .....	- 14 -
3.4.2. Mez úměrnosti.....	- 15 -
3.4.3. Poissonova čísla .....	- 16 -
3.4.4. Energie pružné deformace a práce .....	- 16 -
3.5. Pevnost dřeva .....	- 17 -
3.5.1. Pevnost v tlaku .....	- 18 -
3.5.2. Pevnost v tlaku podél vláken.....	- 18 -
3.6. Vybrané faktory ovlivňující mechanické vlastnosti dřeva .....	- 20 -
3.6.1. Mikroskopická stavba .....	- 20 -
3.6.2. Hustota .....	- 20 -
3.6.3. Vlhkost .....	- 21 -
3.6.4. Růstové podmínky .....	- 23 -
4. Metodika.....	- 24 -
4.1. Příprava zkušebních vzorků .....	- 24 -
4.2. Zkouška na tlak .....	- 25 -
5. Výsledky .....	- 26 -
5.1. Pracovní diagramy .....	- 26 -
5.2. Porovnání vlastností po výšce kmene .....	- 28 -
5.2.1. Hustota dřeva .....	- 28 -

5.2.2.	Mez pevnosti .....	- 29 -
5.2.3.	Poměrná deformace na mezi pevnosti.....	- 30 -
5.2.4.	Mez úměrnosti.....	- 31 -
5.2.5.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr).....	- 32 -
5.2.6.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník) .....	- 33 -
5.2.7.	Modul pružnosti .....	- 34 -
5.2.8.	Práce.....	- 35 -
5.3.	Porovnání vlastností po světových stranách.....	- 36 -
5.3.1.	Hustota dřeva .....	- 36 -
5.3.2.	Mez pevnosti .....	- 37 -
5.3.3.	Poměrná deformace na mezi pevnosti.....	- 38 -
5.3.4.	Mez úměrnosti.....	- 39 -
5.3.5.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr).....	- 40 -
5.3.6.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník) .....	- 41 -
5.3.7.	Modul pružnosti .....	- 42 -
5.3.8.	Práce.....	- 43 -
5.4.	Porovnání vlastností po poloměru kmene .....	- 44 -
5.4.1.	Hustota dřeva .....	- 44 -
5.4.2.	Mez pevnosti .....	- 45 -
5.4.3.	Poměrná deformace na mezi pevnosti.....	- 46 -
5.4.4.	Mez úměrnosti.....	- 47 -
5.4.5.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr).....	- 48 -
5.4.6.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník) .....	- 49 -
5.4.7.	Modul pružnosti .....	- 50 -
5.4.8.	Práce.....	- 51 -
5.5.	Korelace vybraných vlastností .....	- 52 -
6.	<b>Diskuse</b> .....	- 55 -
6.1.	Hustota dřeva .....	- 55 -
6.2.	Mez pevnosti .....	- 56 -
6.3.	Poměrná deformace na mezi pevnosti.....	- 57 -
6.4.	Mez úměrnosti.....	- 57 -
6.5.	Poměrná deformace na mezi úměrnosti .....	- 57 -
6.6.	Modul pružnosti .....	- 58 -
6.7.	Práce.....	- 58 -
6.8.	Korelace naměřených hodnot.....	- 59 -
7.	<b>Závěr</b> .....	- 60 -
8.	<b>Summary</b> .....	- 60 -
9.	<b>Seznam literatury</b> .....	- 62 -
10.	<b>Přílohy</b> .....	- 64 -

## 1. Úvod

Důležitým faktorem při práci s jakýmkoliv materiálem je znalost jeho fyzikálních a mechanických vlastností, u dřeva to platí zvláště. Dřevo, jakožto anizotropní materiál, vykazuje různé vlastnosti ve všech směrech. Důvodem je fakt, že se jedná o přírodní materiál z dřívě živého stromu. Kmen stromu se během růstu chová tak, aby byl maximálně odolný okolnímu prostředí a dokázal čerpat co nejvíce energie z okolí, jak vody a živin z půdy, tak slunečního světla. Vznikají tak dva hlavní směry, směr rovnoběžný s vlákny a směr kolmý na vlákna. Vlastnosti dřeva v těchto dvou směrech jsou výrazně odlišné díky uspořádání jednotlivých elementů dřeva.

Při zkoumání mechanických vlastností ovšem nehraje roli pouze orientace vláken, v jaké se jednotlivé zkoušky provádí, ale i další faktory. Jedním z nich je hustota dřeva, která výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti každého materiálu. S rostoucí hustotou se dá očekávat větší pružnost a pevnost. Neméně cenným faktorem je vlhkost dřeva, zde platí, že s rostoucí vlhkostí dřeva pevnost a pružnost materiálu klesá. Největší pevnost má dřevo při nulové vlhkosti a nejnižší při mezi nasycení buněčných stěn, tedy i v případě, že je dřevo čerstvě skácené.

Jestliže se jedná o anizotropní materiál, dá se očekávat, jednotlivé mechanické vlastnosti společně s hustotou budou měnit svůj charakter v každém místě kmene. Jak po poloměru, tak po výšce kmene. Svou roli může hrát i orientace kmene vůči světovým stranám. Zde platí variabilita dopadajícího slunečního svitu na strom a zatížení v podobě větru, u kterého se dá očekávat nestejný směr působení na kmen. Dřevo, jako materiál je tedy během celé své doby, od malé sazeničky, až po konečný výrobek stále ovlivňováno určitými faktory, některými více, některými méně.

Právě díky znalostem těchto vlastností dřeva je daleko snadnější určit využití jednotlivého druhu dřeva. V případě dřeva využívaného ve stavebnictví jakožto konstrukční materiál se ve většině případů využívá spíše dřevo jehličnatých dřevin, hlavně smrku a jedle. Materiál z těchto dřevin je přesně tím, co člověk u konstrukčního materiálu potřebuje, vysoká pevnost a pružnost na relativně nízkou hustotu, tedy dobré vlastnosti spojeny s nízkou hmotností materiálu. Oproti tomu celá řada dřev listnatých stromů vyznačujících se velkou hustotou a tvrdostí, tedy síle, jakou je třeba pro cizí těleso vyvinout, aby vnikla do materiálu. Takové dřevo je vhodné pro výrobu podlah, schodišť, či různých částí nábytku, jak v interiéru, tak při vhodném zpracování a ochraně dřeva i v exteriéru.

## **2. Cíl práce**

Hlavním cílem této bakalářské práce je stanovení hustoty, meze pevnosti a modulu pružnosti u dřeva javoru mléče (*Acer Platanoides L.*) v čerstvém stavu, jenž pochází z urbanizovaného prostředí. Dalšími zkoumanými vlastnostmi jsou mez úměrnosti, deformace na mezi pevnosti a úměrnosti a potřebná práce při tlaku podél vláken. U všech těchto vlastností bude dále zkoumána jejich variabilita v závislosti na dřívějším umístění měřených vzorků v kmeni stromu. Dalším cílem bude určit, jaký má vliv orientace kmene vůči světovým stranám a po výšce kmene.

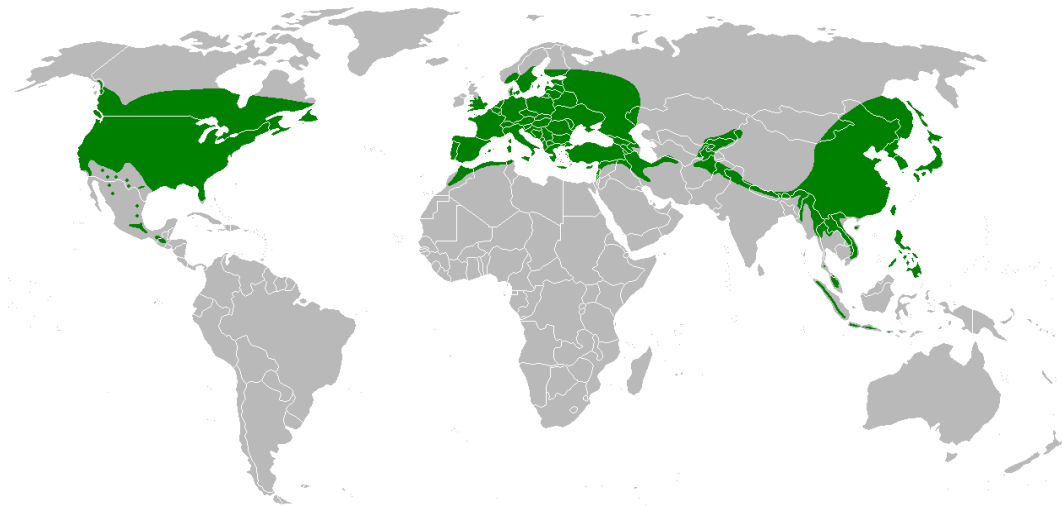


### 3. Literární přehled

#### 3.1. Dendrologický popis

##### 3.1.1. Javor (*Acer*)

Javor patří mezi nejrozšířenější listnaté dřeviny mírného a subtropického pásu severní polokoule, tedy Evropy, Asie a Severní Ameriky. Na světě se vyskytuje zhruba 120-150 druhů, od keřovitých, okrasných druhů, až po udatné stromy vysoké až 30 metrů. V našich lesích se vyskytuje javor mléč (*Acer Platanoides* L.), javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.) a javor babyka (*Acer campestre* L.). Nejčastějším druhem v České republice je právě javor mléč, pro svůj specifický dekorativní vzhled je však více ceněný javor klen. V parcích se můžeme setkat s javorem dlanitolistým (*Acer palmatum* L.), javorem jasanolistým (*Acer negundo* L.), nebo třeba s javorem stříbrným (*Acer saccharinum* L.), jedná se o keřovité druhy javorů (Wagenführ, 2002).



Obr. 1: Mapa světového rozšíření rodu *Acer* (<https://cs.wikipedia.org/javor>)

##### 3.1.2. Javor mléč (*Acer Platanoides* L.)

Říše: rostliny (*Plantae*)

Podříše: cévnaté rostliny (*Tracheobionta*)

Oddělení: krytosemenné (*Magnoliophyta*)

Třída: vyšší dvouděložné (*Rosopsida*)

Řád: mydelníkotvaré (*Sapindales*)

Čeleď: mýdelníkovité (*Sapindaceae*)

Rod: javor (*Acer*)

Druh: javor mléč (*Acer Platanoides* L.)

Jedná se o nejrozšířenější druh javoru na našem území. Tento druh, původně ze střední a východní Evropy lze však díky svým nízkým požadavkům na růst nalézt téměř po celé Evropě. V našich podmínkách dorůstá průměrné výšky 20 až 30 metrů. Díky své značné odolnosti vůči městskému znečištění a schopnosti vytvořit velkou, hustou korunu, se ve velké míře vysazuje v městských parcích a na urbanizovaných místech určených pro zeleň. Při výsadbě v hustých alejích slouží i jako dobrá protihluková stěna. Listy jsou 10 až 15 cm široké, pětiboké, ostré a lesklé. Na místech, kde je kladen důraz na nižší výšku porostů je možné zabránit dalšímu růstu do výšky, díky takzvanému pollardingu. Pollarding je metoda zařezávání větví v zimním období, kdy je strom bez listů. Pomocí této metody jsou odřezány všechny větve až k vrcholu kmene. Na jaře dává všechnu sílu na vytvoření nové, kulaté koruny a výška kmene zůstane zachována. Tento strom se dožívá až 300 let a jeho kmen může být široký až jeden metr (Pokorný, 2003).



Obr. 2: List a plod javoru mléče (<https://cz.pinterest.com/>)

### 3.1.3. Makroskopická stavba dřeva javoru

Jedná se o bělové dřevo s častým výskytem nepravého jádra, který ve velké míře snižuje využití této dřeviny. Jedná se o roztroušeně pórovitou dřevinu s poměrně zřetelnými letokruhy, barva dřeva je žlutá až hnědobílá. Povrch dřeva je lesklý s častým výskytem oček a zvlněnými dřevními vlákny. Dřevo javoru se řadí mezi ty méně trvanlivé, je však dobře impregnovatelné a dobře se suší. Při nulové vlhkosti se jeho hustota pohybuje okolo  $630 \text{ kg/m}^3$ , při vlhkosti  $w=12 \%$  je hustota zhruba  $670 \text{ kg/m}^3$ . Dobře se opracovává, používá se v nábytkářství, snadněji se z něj vyrábí malé složité součásti hudebních nástrojů, nebo dřevěných hraček. Uplatnění najde javor i v řezbářství

a soustružnictví. Zejména dřevo javoru klenu je hojně využíváno pro výrobu okrasných dřív díky častému výskytu oček a zvlněnému průběhu vláken. (Šlezingerová, 2002)



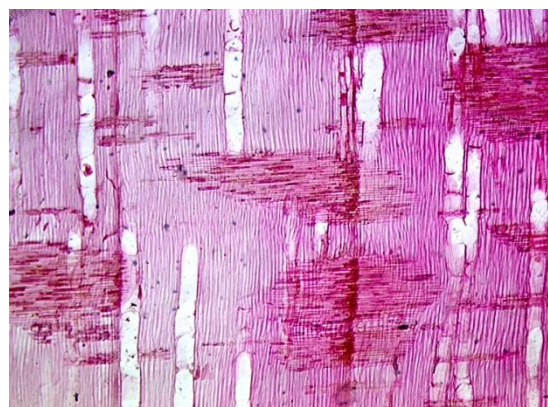
Obr. 3: Makroskopická stavba javoru, (Vavrčík, Lexikon dřev, 2002)

### 3.1.4. Mikroskopická stavba dřeva javoru

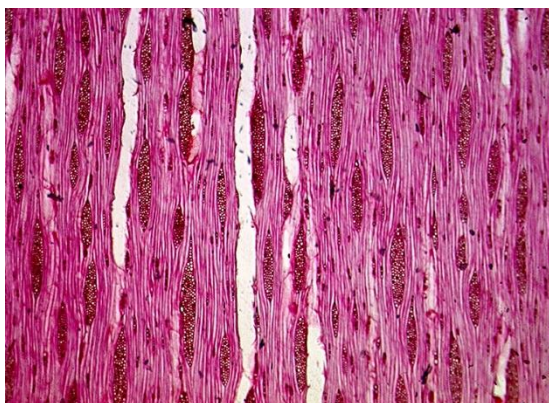
Jako u každé roztroušeně pórovité dřeviny jsou i zde cévy rovnoměrně rozmístěny po celém průřezu jarního dřeva, ve většině případů jednotlivě, ojediněle v radiálních skupinkách. Na hranicích jarního a letního dřeva dochází k mírnému rozšíření dřeňových paprsků. Na podélných řezech jsou zřetelné spirální ztlustěny stěn u cév, libriformní vlákna jsou uspořádány v pravidelných radiálních řadách. Dřeňové paprsky jsou homogenní, 1 až 8 vrstevnaté. U dřeva javoru je také možno v podélných směrech pozorovat vláknité tracheidy (Vavrčík, 2002).



a) příčný řez



b) radiální řez



c) tangenciální řez

*Obr. 4: Mikroskopická stavba javoru (Vavrčík, Lexikon dřev, 2002)*

### **3.2. Hustota dřeva**

Hustota dřeva udává hmotnost objemové jednotky dřeva, nejčastěji se uvádí v  $\text{kg/m}^3$ , nebo v  $\text{g/cm}^3$ . Jedná se o charakteristiku, která významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Dřevo s vyšší hustotou je pevnější, tvrdší a odolnější proti opotřebování. Na rozdíl od jiných materiálů je určení hustoty u dřeva poměrně složité, díky jeho hygroskopicitě. Vlhkostí dřeva je ovlivněna celá řada faktorů, mezi nimi i hmotnost a objem dřeva. Dřevo je porézní materiál a objem těchto pórů (lumeny buněk a mezibuněčné prostory) je u dřeva většinou vyšší než objem buněčných stěn. Póry ve dřevě utvářejí vzájemně spojený, průchodný kapilární systém, který může být zcela zaplněn tekutinou, např. vodou. U mnoha dřevin však dochází k redukci tohoto stavu pomocí doprovodných vyluhovatelných látek, nebo thyl. To sice vede k nižšímu příjmu vody v důsledku teoretického snížení pórovitosti, na druhou stranu se sníží proimpregnovatelnost dřeva (Horáček, 2008). Simpson a Tenwold (1999) uvádí, že na hustotu dřeva mají vliv především tyto dva faktory: hustota buněčných stěn a vlhkost dřeva, jako další faktor může být brán obsah extraktivních látek a minerálů ve dřevě, ty se však nevyskytují u všech druhů dřevin.

Hustota dřeva je jakýmsi ukazatelem vhodnosti použití dřeva na konkrétní účely, u kterých je žádaná vysoká pevnost a pružnost při relativně nízké hmotnosti. V anglicky mluvících zemích se používají pojmy density a specific gravity, přičemž density značí hustotu, která se používá i v zemích s metrickým systémem jednotek. Daleko častěji se zde však uvádí hodnoty specific gravity, jenž vyjadřuje podíl hustoty dřeva a hustoty vody (Simpson a Tenwold, 1999).



Specific gravity se též udává jako podíl hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a hmotnosti vody, jenž dřevo při jeho ponoření vytlačilo. Hodnota hmotnosti dřeva závisí na objemu dřeva, je proto nutné uvést, jaká byla vlhkost dřeva při zjišťování jeho objemu (Panshin, de Zeeuw, 1980).

Němec v Technické příručce lesnické (1964) uvádí hustotu javoru mléče v čerstvém stavu  $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$ . Zatímco další zdroje uvádí tuto hustotu  $\rho = 910 \text{ kg/m}^3$  (www.drevostavitel.cz).

### 3.2.1. Hustota dřevní substance

Dřevní substance je hmota buněčných stěn bez jakýkoliv mezibuněčných prostor, lumenů a submikroskopických dutin. Hustota dřevní substance  $\rho_s$  se vyjadřuje jako poměr hmotnosti dřevní substance  $m_s$  a jejího objemu  $V_s$  (Horáček, 2008).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Jedná se o téměř konstantní hodnotu, která se mění pouze v závislosti na chemickém složení daného dřeva. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí od 1490–1560  $\text{kg/m}^3$  (Požgaj, 1997). Horáček (2008) tyto hodnoty uvádí jako rozmezí 1440–1550  $\text{kg/m}^3$ . Procentuální zastoupení ligninu ve dřevě se pohybuje mezi 15-35 %, což má velký vliv na tuto hodnotu. Průměrné hodnoty základních stavebních složek buněčné stěny pak jsou: celulóza 1560  $\text{kg/m}^3$ , hemicelulóza 1500  $\text{kg/m}^3$  a lignin 1350  $\text{kg/m}^3$ . Vzhledem k tomu, že u různých dřevin je zhruba stejný podíl těchto látek, hustota dřevní substance prakticky nezávisí na druhu dřeviny. Proto se průměrná hodnota  $\rho_s$  pro všechny dřeviny uvádí 1530  $\text{kg/m}^3$ .

Kellogg a Wangaard zkoumali hustotu dřevní substance u několika druhů dřev a tuto hodnotu stanovali v rozmezí 1508-1542  $\text{kg/m}^3$ . Dále uvádějí, že rozdíly hustoty mezi jednotlivými druhy dřev jsou zapříčiněny anatomickou stavbou, zejména tvarem a velikostí buňky a tloušťkou buněčné stěny (Kellogg a Wangaard, 1969).

Hmotnost dřevní substance  $m_s$  se zjišťuje jednoduše pomocí vážení. Zjištění objemu dřevní substance  $V_s$  je ale složitější, tenké řezy se ponoří do látky nezpůsobující bobtnání, jako je benzen, či toluen, případně do plynů. Hustota dřevní substance je důležitá při teoretických výpočtech pórovitosti dřeva, nasákivosti (maximální vlhkosti) a při technologických procesech u impregnace dřeva.

### 3.2.2. Hustota dřeva v závislosti na vlhkosti

Při charakteristice hustoty dřeva se nejčastěji používají tyto vlhkostní stavy: hustota dřeva v suchém stavu ( $w = 0 \%$ ), hustota dřeva při vlhkosti 12 % a hustota dřeva vlhkého ( $w > 0 \%$ ). Při teoretických výpočtech a možnostech porovnání výsledků se nejčastěji používá hustota v absolutně suchém stavu  $\rho_0$ . To je stav, kdy je vlhkost dřeva nulová, tedy  $w = 0 \%$ . Hustota dřeva v absolutně suchém stavu je menší než hustota dřevní substance, jelikož se zde započítává i objem mezibuněčných prostor, lumenů a mikrokapilár vyplněných vzduchem. Hustota dřeva v suchém stavu se vypočítá jako podíl hmotnosti suchého dřeva  $m_0$  a objemu suchého dřeva  $V_0$  (Horáček, 2008).

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Hustota vlhkého dřeva se poté vypočítá stejným způsobem, jako podíl hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Často uváděnou hodnotou je hustota dřeva při vlhkosti 12 %. Tato hodnota je uváděná v platných normách, jelikož vlhkost 12 % je běžná vlhkost dřeva při jeho dlouhodobém vystavení v místnosti s běžnými podmínkami ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 65 \%$ ). Podle Matoviče (1993) rozdělujeme dřeva podle jejich hustoty při vlhkosti 12 % do tří skupin. Dřeva s nízkou hustotou ( $\rho_{12} < 540 \text{ kg/m}^3$ ), dřeva se střední hustotou ( $\rho_{12} = 540\text{-}750 \text{ kg/m}^3$ ) a dřeva s vysokou hustotou ( $\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$ ).

Se zvyšující se vlhkostí roste hmotnost a objem dřeva, ne však stejným způsobem. Hmotnost dřeva roste se zvyšující se vlhkostí až do maximálního nasycení dřeva vodou, zatímco objem roste pouze do meze hygroskopicity (Horáček, 2008).

### 3.2.3. Variabilita hustoty dřeva

Hustota dřeva závisí na celé řadě faktorů, jedním z nejdůležitějších je chemické složení dřeva, stavba dřeva a vlhkost. Chemické složení neovlivňuje pouze hustotu dřevní substance, ale i samotnou hustotu dřeva díky zastoupení dalších látek kromě celulózy, hemicelulózy a ligninu. Takovými látkami mohou být například extraktivní látky, jež zvyšují hustotu jádrového dřeva. Listnatá dřeva kruhovitě-pórovitá mají ve většině případů vyšší hustotu než roztroušeně pórovitá dřeva, právě díky obsahu extraktivním látkám v jádrovém dřevě (Horáček, 2008).

Dalším faktorem, který může mít na naměřené hodnoty, je dřívější poloha jednotlivých měřených vzorků ve kmeni. Svou roli bezesporu hrají i stanovištní podmínky při růstu stromu a pěstební opatření. Variabilita hustoty ve kmeni není pouze po jeho šířce, ale i po výšce kmene. Rozdílné hodnoty hustoty po poloměru kmene jsou z velké části zapříčiněny nepravidelností v šířce letokruhů. U jehličnatých dřevin roste hustota se snižující se šířkou letokruhů, což způsobuje větší podíl letního dřeva. U listnatých dřevin, až na některé roztroušeně pórovitá dřeva, je tendence opačná. S rostoucí šířkou letokruhů se zvyšuje podíl letního dřeva a tím i jeho hustota. Podíl jarního a letního dřeva hraje svojí roli i v případě variability hustoty po výšce kmene. Největší podíl letního dřeva je na spodní části kmene a směrem nahoru tento podíl klesá. To znamená, že s rostoucí výškou kmene klesá hustota dřeva (Požgaj et al., 1997). U listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva se jedná o obtížnější určení, tyto vlastnosti nemají tak jasný průběh, jako u jehličnatých, nebo listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou, u roztroušeně pórovitých listnáčů záleží na každém konkrétním druhu (Lexa et al. 1952).

Také Perelygin (1960) uvádí, že nejlepší fyzikální a mechanické vlastnosti má dřevo ve spodní části kmene a směrem nahoru se tyto vlastnosti postupně zhoršují. V oblasti koruny však může dojít ke zlepšení těchto vlastností vlivem okolního namáhání koruny větrem, může zde dojít ke vzniku reakčního dřeva.

Variabilitou vlastností dřeva v jednotlivých částech kmene se zabýval Markward a Wilson. Uvedli, že pro přesnost měření je potřeba zvýšit množství zkušebních vzorků, navíc z každé části kmene stromu. Čímž se dala popsat distribuce vlastností dřeva po poloměru a výšce. Tato metoda se nazývá křížová (Markward a Wilson, 1935).

Muller-Stoll (1948) uvádí rozdíly hustoty pro *Acer Platanoides* L. mezi jarním a letním dřevem, u jarního dřeva uvádí hustotu v rozmezí 500-530 kg/m<sup>3</sup> a u letního dřeva 668-751 kg/m<sup>3</sup> u dřeva v absolutně suchém stavu.

### **3.3. Mechanické vlastnosti dřeva**

Dřevo, jakožto materiál organického původu, má své nenahraditelné vlastnosti. Patří zde i mechanické vlastnosti, hlavně pružnost a pevnost. Dřevo se řadí mezi výborný konstrukční materiál a to hlavně díky jeho vysoké pevnosti při relativně nízké hmotnosti. Mechanické vlastnosti mají vliv i na další technologické zpracování dřeva, jako je řezání, ohýbání, lisování, nebo sušení. Proto je velmi důležitá znalost reakcí dřeva při jednotlivých druzích mechanických namáhání.

Mechanické vlastnosti se dělí na dvě hlavní části, základní a odvozené. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost materiálu. Odvozenými mechanickými vlastnostmi jsou tvrdost, odolnost proti trvalému zatížení, odolnost proti únavovému lomu a odolnost proti tečení. Další nezanedbatelnou skupinou jsou technologické vlastnosti dřeva, jako je trvanlivost, obrobitelnost, sušitelnost a další (Požgaj, 1997).

První komplexní práce vedoucí k vyhodnocení mechanických vlastností dřeva byly provedeny na malých, normovaných vzorcích ve Spojených státech v roce 1935 (Markward a Wilson, 1935).

Později byly pro různé příručky o dřevě a materiálech na bázi dřeva zaznamenány nová data, podle ASTM (*American Society for Testing Materials*). Údaje pro kanadské druhy dřevin byly shrnuty Kennedym (Kennedy, 1965).

### **3.3.1. Anizotropie mechanických vlastností**

Dřevo je jako každý materiál tvořeno atomy a molekulami, které jsou buďto náhodně, nebo pravidelně uspořádány. Právě jednotlivých atomů a molekul a zejména orientace jejich kovalentních a vodíkových vazeb určuje velikost a orientaci mechanických vlastností na makroskopické, ale i mikroskopické úrovni. Rozdílnost mechanických vlastností v jednotlivých směrech a v jednotlivých místech objemu dřeva se nazývá anizotropie mechanických vlastností. Tvar a uspořádání základních elementů dřeva, především libriformních vláken a tracheid, nebo směr mikrofibril ve středních vrstvách sekundárních stěn buňky jsou hlavním důvodem rozdílů mechanických vlastností v podélném a příčném směru (Horáček, 2008).

Z experimentálních zkoušek pružnostních a pevnostních vlastností byly zjištěny rozdíly nejen v rámci směru podélném a příčném, ale příčný směr se dále rozděluje na směr tangenciální a radiální, podle směru letokruhů. Vliv anizotropie ve dřevě je možné částečně odstranit pomocí různých technologických úprav dřeva. Například pomocí modifikace dřeva čpavkem, nebo lisováním je možné snížit rozdíl pružnostních a pevnostních vlastností kolmo na vlákna v radiálním a tangenciálním směru (Požgaj, 1997).



### 3.3.2. Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je proces, při kterém dochází k interakci mezi mechanickými silami, nebo jinými činiteli napětí a tělesem. Výsledkem takového procesu jsou dočasné, nebo trvalé změny tvaru namáhaného tělesa, například dřeva. Na dřevo působí vnější síly, které ho deformují v závislosti na velikosti vnitřního odporu jeho struktury. Reakce dřeva na mechanické namáhání ovšem nezávisí pouze na vazbách chemických složek a jejich vzájemném spojení, ale i na samotném tvaru namáhaného tělesa. Chemické složení a struktura dřeva se z tohoto hlediska sleduje na třech úrovních, makroskopické, mikroskopické a na mikroskopické úrovni sahající až do struktury polymerů. Rozdílné mechanické vlastnosti na makroskopické úrovni jsou pak patrné mezi bělí a jádrem, jarním a letním dřevem. Na mikroskopické úrovni jsou pak tyto rozdíly mezi jednotlivými tracheidami, libriformními vlákny a cévami. Rozdíly v chemickém složení jsou zapříčiněny různým zastoupením amorfni a krystalické celulózy, hemicelulózy a ligninu, důležitá je rovněž spojitost mezi jednotlivými polymery.

Interakcí mechanického namáhání určitého tělesa a s jeho odporem v tělese vzniká určitý stav napětí. Takové namáhání může být buďto statické (časově neměnné), nebo dynamické (měnící se s časem). Kritériem mechanického namáhání je stav napětí a časové kritérium napětí. Stav napětí značí počet, druh a průběh napětí v objemu dřeva a vztahy mezi nimi. Podle počtu působících sil se rozděluje stav napětí na jednoosé, dvojosé, či víceosé (Požgaj, 1997).

### 3.3.3. Napětí

Napětí ve dřevě je velikost vnitřních sil, které v tělese vznikají díky vnějším mechanickým silám působících na těleso. Napětí je velikost vnitřní síly vztažena na plochu namáhaného průřezu. Pokud síla působí na danou plochu rovnoměrně, napětí se vypočítá jako podíl působící síly  $F$  a plochy  $S$ .

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [MPa]$$

Podle směru působící síly se napětí dělí na normálové a tangenciální. Při působení síly kolmo na plochu namáhaného průřezu, jedná se o normálové napětí ( $\sigma$ ), pokud síla působí rovnoběžně s plochou, pak se jedná o namáhání tangenciální ( $\tau$ ).

### 3.3.4. Deformace

Všechny materiály se dají deformovat působením různých sil, ať už se jedná o působení vnějšího zatížení, vlhkostního napětí, nebo například změny teploty (Dugas, 1955).

Deformace je definovaná jako změna tvaru a rozměrů tělesa vlivem působení vnějších sil. Ve dřevě můžou být deformace vyvolány i náhlou změnou vlhkosti, tedy vlhkostním napětím. Deformace dřeva se dělí na pružné ( $\epsilon_p$ ), deformace pružné v čase ( $\epsilon_c$ ) a plastické deformace ( $\epsilon_{pl}$ ). Mechanické síly vyvolají deformaci, která je součtem všech těchto tří deformací.

Pružná deformace je taková, po které se tvar a rozměry dřeva vrátí do své původní polohy, jedná se tedy o změnu vratnou. Pokud dřevo vyvolává jen tyto deformace, jedná se o změnu vratnou a jeho stav napětí se nachází v pružné oblasti.

Pružná deformace v čase znamená, že se tvar tělesa po odstranění působících vnějších sil nevrátí do své původní polohy hned, ale tato vratná změna trvá delší dobu. Jestliže je dřevo deformováno pružně i pružně v čase, pak se jedná o takzvaný stav napětí v pružno-viskozni oblasti. Tento stav se výrazně projevuje při trvalém zatížení dřeva.

Trvalá deformace je deformace, při které dojde k trvalé změně tvaru tělesa. Po odstranění působících sil se tvar již nevrátí do své původní polohy. Stav napětí dřeva, při kterém dojde ke kombinaci trvalé deformace a dvou předchozích deformací, se značí jako stav napětí v pružno-vizko-plastické deformaci (Požgaj, 1997).

### 3.3.5. Vztah mezi napětím a deformací

Při výběru jednotlivých konstrukčních materiálů je důležité znát vztahy mezi napětím a deformací. Tyto vztahy se berou v úvahu i při určování technologických parametrů při zpracování dřeva, jako je například lisování. V praxi se tyto vztahy uvádí ve zjednodušených diagramech napětí-deformace. Podle Roberta Hooka (1635-1703), který se vztahem mezi napětím a deformací zabýval jako první, je deformace do určité fáze zatížení úměrná působící síle.

Právě Robert Hooke prováděl experimenty se dřevem a dalšími přírodními materiály. Jako první rozdělil deformaci podélných vláken v ohybu na dvě části. Vlákná na vnější části jsou namáhána na tah, zatímco vlákna na vnitřní části jsou namáhána na tlak (Dugas, 1955).

Hookův zákon zní: „deformace je přímo úměrná napětí materiálu“. Platí zde vztah pro změnu jednotky délky na jednotku napětí u namáhaného tělesa.

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma}$$

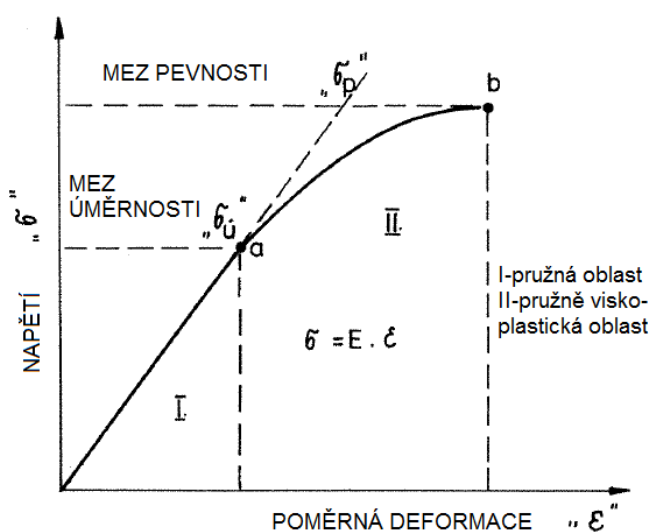
Přičemž  $\alpha$  značí změnu jednotky délky tyče na jednotku napětí,  $\varepsilon$  je poměrné délkové prodloužení a  $\sigma$  značí napětí v daném tělese.

Později definoval Young (1802) převrácenou hodnotu  $\alpha$  jako modul pružnosti v tahu a tlaku  $E$ .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Tento vztah se nazývá Youngův modul pružnosti a v praxi se využívá častěji než předchozí vztah.

Diagram znázorňující vztah mezi napětím a deformací pro dřevo se skládá ze dvou hlavních částí, lineární část po mez úměrnosti  $\sigma_u$  a poté nelineární část do meze pevnosti  $\sigma_p$ .



Obr. 5: Diagram napětí-deformace pro dřevo

Do meze úměrnosti je možné pozorovat pouze pružné deformace, to znamená, že při uvolnění vnějších sil se tvar tělesa vrátí do své původní polohy. Je to zapříčiněno tím, že do meze úměrnosti vznikají v tělese pouze pružné deformace a napětí se zde rozděluje rovnoměrně. Z druhé části diagramu je patrné, že zde už není rovnoměrné napětí, jedná se tedy o pružně visko-plastickou oblast. Z hlediska molekulární úrovně do meze úměrnosti dochází pouze k ulomení, posunutí a následnému seskupení jednotlivých polymerových řetězců. Porušují se zde vodíkové vazby, u kovalentních vazeb v tomto případě dochází pouze k deformaci benzenových jader.

V části nad mezí úměrnosti dochází k porušení nejen vodíkových, ale i kovalentních vazeb. Díky tomu dochází k nevratným procesům a vzniká plastická deformace (Požgaj, 1997).

### **3.4. Pružnost dřeva**

Pružností se rozumí schopnost materiálu vrátit se na svůj původní tvar a rozměry po odstranění jakéhokoli druhu namáhání. Z pohledu fyzikálního dochází k tomu, že se atomy po odstranění vnějších sil vrátí do svých rovnovážných vzdáleností takovým způsobem, aby dosáhly co nejnižší potenciální energie. Při měření deformací pomocí běžných přístrojů, jako je tenzometr, nebo odchylkoměr je možné pružnost z makroskopického hlediska pokládat za zcela vratný proces. Ovšem z pohledu submikroskopické úrovně nemusí vždy tyto vratné změny nastat. Z hlediska termodynamiky nedochází pouze k deformaci, ale i ke změně objemu materiálu. Takový proces se nazývá adiabatický, nedochází při něm k tepelné výměně mezi materiálem a okolím, jelikož děj proběhne tak rychle, že se výměna tepla nestihne uskutečnit. Během procesu zatížení materiálu a následného uvolnění neprobíhá proces v jedné rovině, ale vytváří tzv. hysterezní křivku. Elastická hystereze neboli dopružování znamená, že po odstranění veškerého zatížení se deformace vytrácí postupně. Je tedy patrné, že ani dřevo není dokonale pružný materiál, stejně jako kupříkladu kovové materiály, v takovém případě se dá hovořit o těchto materiálech jako o ne zcela elastických.

Žádný materiál se nedá považovat za dokonale pružný, i když některé k tomu mají velmi blízko, zejména u relativně malého zatížení. Roku 1821 M. Navier poprvé sestrojil rovnici pro rovnováhu a pohyb pevných, elastických látek (Dugas, 1955).

Pružnost má velký význam i z praktického hlediska, jelikož má výrazný vliv na všechny charakteristiky, které jsou obsaženy v lineární části diagramu napětí-deformace. Těmito charakteristikami jsou hlavně modul pružnosti  $E$ , mez úměrnosti  $\sigma_u$ , Poissonova čísla  $\mu$ , ale i energie pružné deformace  $W_p$ .

#### **3.4.1. Modul pružnosti**

Modulem pružnosti se rozumí schopnost materiálu odolávat pružným deformacím. S rostoucím modulem pružnosti je potřeba vyvinout větší napětí, aby došlo k deformaci. Čím je látka poddajnější, tím je modul pružnosti látky menší, modul pružnosti je tedy jakýmsi měřítkem tuhosti (Lexa et al., 1952).

Při namáhání dřeva ve směru vláken je modul pružnosti zhruba 25krát vyšší, než při zatížení kolmo na vlákna (Pashin, de Zeeuw, 1980).

Při normálových napětích, jako je tah, tlak, ohyb se jedná o modul pružnosti  $E$ , pro tangenciální namáhání, jako je smyk a krut se jedná o modul  $G$ . U víceosého namáhání se jedná o modul pružnosti  $E_k$ . Modul pružnosti  $E$  pro normálová namáhání se vyjádří jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací. Po dosazení vztahů se jedná o tento vzorec:

$$E = \frac{F_{\dot{u}} \cdot l}{S \cdot \Delta u_1} [Pa]$$

Přičemž  $F_{\dot{u}}$  je síla působící na mezi úměrnosti (N),  $l$  je počáteční délka měřeného tělesa (m),  $S$  je plocha, na níž působí síla ( $m^2$ ) a  $\Delta u_1$  značí absolutní deformaci, tedy změnu rozměru ve směru působení vnější síly (m). Udává se v pascálech (Pa), jelikož se ale ve většině případů jedná o čísla v šestimístných řádech a více, pro jednoduchost se moduly pružnosti uvádí spíše v megapascálech (MPa).

Rozmezí hodnot modulu pružnosti ve smyku  $G$  se u našich dřevin pohybuje okolo 100 až 2000 MPa pro dřeva s vlhkostí  $w = 12 \%$ . Záleží ovšem na směru působící síly, největší hodnoty modulu pružnosti vykazuje dřevo v radiální rovině, naopak nejmenší v příčné rovině. Moduly pružnosti pro normálové namáhání  $E$  se pohybují v rozmezí od 7000 do 15000 MPa. Modul pružnosti čerstvého javoru se pohybuje od 7600 do 11 300 MPa (Bergman, 2010).

### 3.4.2. Mez úměrnosti

Pokud na dřevo působí taková vnější síla, že napětí překročí mez úměrnosti, na diagramu napětí-deformace začne křivka pomalu přecházet z lineárního průběhu do nelineárního. Je to zapříčiněno tím, že se ve dřevě začínají objevovat plastické deformace a deformace pružné v čase. Bod na křivce, který leží na hranici mezi lineární a nelineární částí označuje napětí na mezi úměrnosti  $\sigma_{\dot{u}}$ . Jedná se o takové napětí, při kterém ještě nevznikají žádné plastické deformace, ani deformace pružné v čase. Do tohoto bodu platí mezi napětím a deformací přímá úměra. V souvislosti s mezí úměrnosti je třeba brát ohled i na dobu zatížení, výše uvedené vztahy platí hlavně pro krátkodobé zatížení materiálu, které netrvá déle než dvě až čtyři minuty. U trvalého zatížení se dřevo po mezi úměrnosti chová jako viskózně-pružný materiál. Kromě pružných deformací však pod mezí úměrnosti vznikají i plastické deformace a deformace pružné v čase, tyto deformace jsou u tohoto způsobu zatížení prokazatelnější (Požgaj, 1997).

### 3.4.3. Poissonova čísla

Další důležitou charakteristikou u pružnosti dřeva jsou Poissonova čísla, využití naleznou hlavně u objemových změn materiálu způsobené zatížením. Jestliže se vzorek dřeva o tvaru hranolu namáhá na tah, či tlak, vznikají v něm deformace ve směru působící síly, u tlaku zkrácení a u tahu prodloužení. Vznikají zde však i deformace ve směru kolmém na směr působící síly. Ty se nazývají příčné deformace, nejedná se však o deformace kolmé na vlákna. U zatížení dřeva tlakem dochází k příčné deformaci kladné, rozměry vzorku se při působení tlaku po průřezu zvětšují, u zatížení tahem se jedná o opačný jev (Požgaj, 1997).

Deformace ve směru působící síly se nazývá aktivní deformace, zatímco deformace kolmá ke směru působící síly je deformací pasivní (Jayne B.A., 1972).

Poissonovo číslo je vyjádření poměru mezi příčnou a podélnou deformací, u tlaku rovnoběžně s vlákny se jedná o tyto dva Poissonova čísla:

$$\mu_{TL} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} ; \mu_{RL} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L}$$

Příčemž  $\varepsilon_T$  značí příčnou deformaci ve směru tangenciálním,  $\varepsilon_R$  příčnou deformaci ve směru radiálním a  $\varepsilon_L$  poměrnou deformaci ve směru vláken, v tomto případě tedy i ve směru síly.

### 3.4.4. Energie pružné deformace a práce

Velikost energie pružné deformace se zjistí pomocí integrálu z přímky, která značí lineární průběh v diagramu deformace-napětí. Tedy z křivky znázorňující napětí do meze úměrnosti. Energie pružné deformace  $W_p$  se vypočítá podle zjednodušeného vztahu:

$$W_p = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot V_0$$

Kde  $\sigma$  značí napětí,  $E$  daný modul pružnosti a  $V_0$  znamená objem namáhaného tělesa. V tělese se nahromadí energie pružné deformace, jejíž velikost je přímo úměrná čtverci působícího napětí a objemu daného tělesa, naopak je nepřímo úměrná modulu pružnosti  $E$ .

Práce udává součin síly působící na těleso a dráhy, kterou těleso urazí, nebo o kterou je těleso při tlaku, nebo tahu zkráceno, či prodlouženo. Jednotkou energie a práce je joule (J), též se udává jako  $N \cdot m$  (v našem případě  $N \cdot mm$ ).

### 3.5. Pevnost dřeva

Pevnost dřeva je charakterizována jako odpor dřeva proti jeho trvalému porušení vlivem vnějších sil. Vyjadřuje se pomocí napětí, při kterém dojde k trvalé deformaci dřeva. Teoreticky se pevnost rozlišuje na tři druhy: konvenční neboli domluvená pevnost, skutečná pevnost a teoretickou pevnost, která je označována za ideální.

Konvenční pevnost určuje největší napětí vyjadřující určitý stav při zatížení. Jedná se tedy o největší napětí, které působí na průřez zkušebního tělesa. U zjišťování pevnosti dřeva však tato možnost není ideální.

Skutečná pevnost je definována jako velikost skutečného napětí v okamžiku porušení zkušebního tělesa vztažená k jeho původnímu průřezu.

Jako ideální pevnost se rozumí maximální teoretická pevnost dané dřeviny při daném způsobu zatěžování. Teoretický se dá ideální pevnost vypočítat pomocí meziatomových vazbových sil. Ideální pevnost, zejména u kovů, závisí hlavně na vazbách, jejich četnosti a uspořádání v krystalické mřížce. U izotropních materiálů je zjištění ideální pevnosti daleko jednodušší, než je tomu u materiálů anizotropních, jako je dřevo. Dřevo obsahuje různé chemické složky (celulóza, hemicelulóza, lignin), z nichž každá složka obsahuje jiné druhy vazeb. Navíc dřevo obsahuje až z 30 % amorfni část, částice jsou tedy v látce uspořádány zcela náhodně.

V praxi se pevnost dřeva zjišťuje pomocí zkoušek, které mají dány jasný postup a pravidla. Hodnoty získané těmito zkouškami nejsou absolutními konstantami dřeva, které se nemění, jedná se o hodnoty, které závisí i na způsobu provádění samotné zkoušky. Aby mohlo dojít ke vzájemnému porovnávání těchto vlastností dřeva, bylo se potřeba dohodnout na jednotvárných zkušebních postupech. Konvenčnost vlastností je tedy údaj, který se získal pomocí přísného dodržování metodiky měření a dohodnuté vlhkosti dřeva a teploty. Pevnost dřeva se rozděluje podle způsobu namáhání jednotlivých zkušebních těles na pevnost v: tahu, tlaku, smyku, krutu, ohybu (Požgaj, 1997).

Už Leonardo da Vinci zkoumal pevnost materiálů pro zjištění jejich maximálního zatížení. Nejprve u železných drátů různých délek, poté u dřevěných trámů o různé délce a průřezu. Kladl důraz na přísnější dimenzování prvků a poměr šířky k délce prvku. Přišel na to, že kratší prvek prokazuje lepší pevnostní vlastnosti než delší prvek o stejném průřezu. U zkoumání sloupů rovněž uvedl, že jejich pevnost se přímo zvyšuje s průřezem, s rostoucí délkou se však tyto vlastnosti zhoršují (Hart, 1925).

Zkušební metody se dělí podle časového průběhu působící síly na statické a dynamické. U statického namáhání platí, že na těleso působí síla o stejné velikosti, jenž

se v průběhu nijak nemění. Příkladem statického namáhání můžou být například různé stavební konstrukce, jako jsou nosné trámy a podobně. Naopak dynamické napětí jednorázové, či skokové namáhání měnící se v průběhu času. Příkladem dynamického napětí můžou být projíždějící auta po mostě (Kunc A. a kol., 1961).

Dále také podle účinku působícího zatížení na dřevo na destruktivní a nedestruktivní. U destruktivní metody, jak již z názvu vyplývá, dojde k trvalému porušení zkušební tělesa vlivem působící síly (u zkoušky na tlak se vzorek stlačí, u tahu až roztrhne atd.). Pomocí nedestruktivní metody nedojde k žádnému porušení tvaru, vnitřní struktury, ani chemického složení dřeva. Mezi nedestruktivní metody patří například metoda DIC (digitální obrazová korelace), jedná se o optickou metodu, která slouží k měření prostorových proměnných posunutí a deformací.

### **3.5.1. Pevnost v tlaku**

Pevnost v tlaku se rozděluje podle směru působící síly na zkušební těleso na tyto skupiny:

- a) pevnost v tlaku podél vláken ( $\sigma_L$ )
- b) pevnost v tlaku kolmo na vlákna – radiální směr ( $\sigma_R$ )
- c) pevnost v tlaku kolmo na vlákna – tangenciální směr ( $\sigma_T$ )

Standartní testy na dřevo podle ASTM (*American Society for Testing Materials*) dva typy testů: měření vlastností u tlaku podél vláken a u tlaku kolmo na vlákna. U těchto metod se používají vzorky a přesně daných rozměrech a tvaru. Ve větší míře se využívá zkoušení na tlak podél vláken, výsledkem jsou pak hodnoty o mezním napětí, maximálním napětí a modulu pružnosti (Bodig a Jayne, 1993).

Perelygin (1960) uvádí, že dřevo z obvodové části kmene má zhruba o 20 % nižší hustotu a tlakovou pevnost ve směru vláken než dřevo ze středové části kmene.

### **3.5.2. Pevnost v tlaku podél vláken**

Nejčastějším směrem pro zjišťování pevnosti u dřeva je směr podél vláken. Díky velkému využití dřevěných prvků a jejich zatěžování v praxi právě v tomto směru (vzpěry, nosníky, sloupky a jiné části stavební konstrukce).

Pevnost dřeva a velikost deformace závisí hlavně na vzájemném propojení a samotné pevnosti anatomických elementů dané dřeviny, u listnatých dřevin se hovoří hlavně o libriformních vláknech. Pevnost libriformních vláken závisí především na střední vrstvě  $S_2$  v sekundární buněčné stěně. Pevnost a stabilitu jednotlivých vláken



může dále ovlivnit i jejich samotné rozměry a tvar, hlavně tedy štíhlost jednotlivých vláken. Dřevo zatížené rovnoběžně s vlákny si je možné představit jako model složený ze svazků dutých vláken, které jsou navzájem propojené mezibuněčnou vrstvou. U jehličnatých a kruhovitě pórovitých dřevin se jedná o pravidelné střídání vrstev mezi vlákny o menších a větších průměrech, což značí rozdíl mezi letním a jarním dřevem. U roztroušeně pórovitých dřevin jsou však vlákna o větších průměrech, ale mají tenčí stěny, vlákna jsou navíc v celé části letokruhu rozdělena rovnoměrně. Kompaktnost takového systému může být ovšem narušena díky dřevovým paprskům. Jedná se o seskupení parenchymatických buněk, které jsou umístěny kolmo na podélnou osu kmene. Předpokládá se, že tloušťka stěn jednotlivých elementů závisí na podílu přenášení napětí, elementy s hrubší stěnou tedy nesou větší zatížení, než tenčí. V případě jehličnatých dřev se jedná o letní tracheidy, které mají menší průřezové rozměry, ale hrubší stěnu. Letní tracheidy tak vykonávají funkci mechanickou, naopak jarní tracheidy funkci vodící a nutriční. U listnatých dřev přejímají mechanickou funkci převážně libriformní vlákna. Jsou to axiálně uložené anatomické elementy, jejich zastoupení záleží na druhu dřeviny, průměrný podíl libriformních vláken u našich listnatých dřevin se pohybuje v rozmezí 50-75 %.

Napětí ve stěnách buněk je přenášeno pomocí makromolekul celulózy přes krystalické a amorfní místa. Celulóza, jakožto hlavní stavební prvek dřeva vytváří pomyslnou kostru, která je dále vyplněna hemicelulózou a ligninem. Tyto látky mají na pevnost dřeva rovněž velký podíl, jelikož celulózovou kostru vyplňují, zejména lignin. Hemicelulóza slouží jako pojivo mezi ligninem a celulózou. Amorfní místa jsou však v buněčné stěně slabší částí než celulózová kostra. Dochází zde k větší deformaci během zatížení a to nejen při zatížení mechanickém, ale i při styku s vodou během tzv. sorpčních procesů.

Hodnoty pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny se u našich dřevin pohybuje v rozmezí od 30-70 MPa. Mezi dřeviny s největší pevností v tlaku podél vláken patří dřevo akátu, habru, nebo dubu, nejnižší hodnoty pak vykazuje dřevo olše, či topolu. Variabilita hodnot u pevnosti v tlaku podél vláken kolísá v rozpětí od 8 do 16 %.

Mez úměrnosti je téměř poloviční než mez pevnosti, jak u listnatých, tak jehličnatých dřevin se jedná o zhruba stejný podíl. Větší mez úměrnosti však mají jehličnaté dřeviny, díky jejich pravidelnější anatomické stavbě. Další v pořadí jsou měkké roztroušeně pórovité listnaté dřeviny a nejnižší mez úměrnosti mají tvrdé listnáče (kruhovitě pórovité i roztroušeně pórovité).

Mez pevnosti javoru v čerstvém stavu se udává jako  $\bar{\sigma}_p = 22,3$  až  $27,7$  MPa (Bergman, 2010). Technická univerzita ve Zvoleni uvádí mez pevnosti javoru při vlhkosti 12 % jako  $\bar{\sigma}_p = 53$  MPa a v čerstvém stavu  $\bar{\sigma}_p = 29$  MPa. (www.tuzvo.sk).

Při zatěžování suchého dřeva s vyšší hustotou dojde u překročení meze pevnosti k porušení ve formě smyku. U dřeva s vyšší vlhkostí dochází k otláčení čelních ploch a k vybočení stěn vzorku.

### **3.6. Vybrané faktory ovlivňující mechanické vlastnosti dřeva**

#### **3.6.1. Mikroskopická stavba**

Rozměry jednotlivých anatomických, zejména mechanických elementů mají velký vliv na jeho pevnost. Ta roste se zvyšující se koncentrací těchto elementů a s rostoucí tloušťkou jejich stěn. Rozdíly mechanických vlastností jednotlivých dřevin závisí na množství dřeva na jednotku objemu, ale i na vnitřní stavbě a struktuře dřeva. Dřeva jehličnatých stromů vykazují daleko větší pružnost a pevnost než dřeva listnatých stromů díky větší pravidelnosti stavby jednotlivých elementů (Požgaj, 1997).

#### **3.6.2. Hustota**

Hustota dřeva přímo závisí na rozměrech jednotlivých elementů a jejich podílu ve dřevě, dále jí také ovlivňují šířky letokruhů a zastoupení jarního a letního dřeva v nich. Určení závislosti mezi hustotou a mechanickými vlastnostmi je složitější, protože pevnost dřeva nezávisí pouze na množství dřevní hmoty na jednotku objemu, ale i na stavbě konkrétního dřeva.

Mezi modulem pružnosti a hustotou při tlaku ve směru vláken platí přímá úměra, s rostoucí hustotou roste modul pružnosti  $E$ . Stejně je tomu tak u většiny dřevin, co se týče pevnosti v tlaku, s rostoucí hustotou se zvyšuje i pevnost v tlaku podél vláken. Ovšem vztah mezi hustotou a pevností nemusí vždy platit, výjimkou může být nepravidelnost ve stavbě dřeva, nehomogenost a celkově odlišná struktura dřeva, než je obvyklé. Příkladem je dřevo buku, jehož pevnost v tlaku podél vláken se s rostoucí hustotou nijak zvlášť nemění.

U většiny dřev je dalším ovlivňujícím faktorem šířka letokruhů a podíl jarního a letního dřeva. U roztroušeně pórovitých dřevin však není šířka letokruhů vhodným ukazatelem pevnostních vlastností, jelikož jsou v tomto případě těžko rozeznatelné hranice mezi jednotlivými letokruhy, navíc nelze zřetelně rozeznat jarní a letní dřevo. U roztroušeně pórovitých dřevin tedy nelze přesně určit, jaký vliv má šířka letokruhů na

hustotu. Proto bylo v tomto ohledu důležité navrhnout jiný ukazatel hustoty pro tyto druhy dřevin, jedním z nich je podíl cév v letokruhu, tedy jejich koncentrace. Ani v tomto případě se však nejedná o spolehlivé určení. Při porovnání dřeva buku a břízy se zjistilo, přesto že má buk více cév, je těžší než bříza. Je to způsobeno tlustšími buněčnými stěnami vláken (Požgaj, 1997).

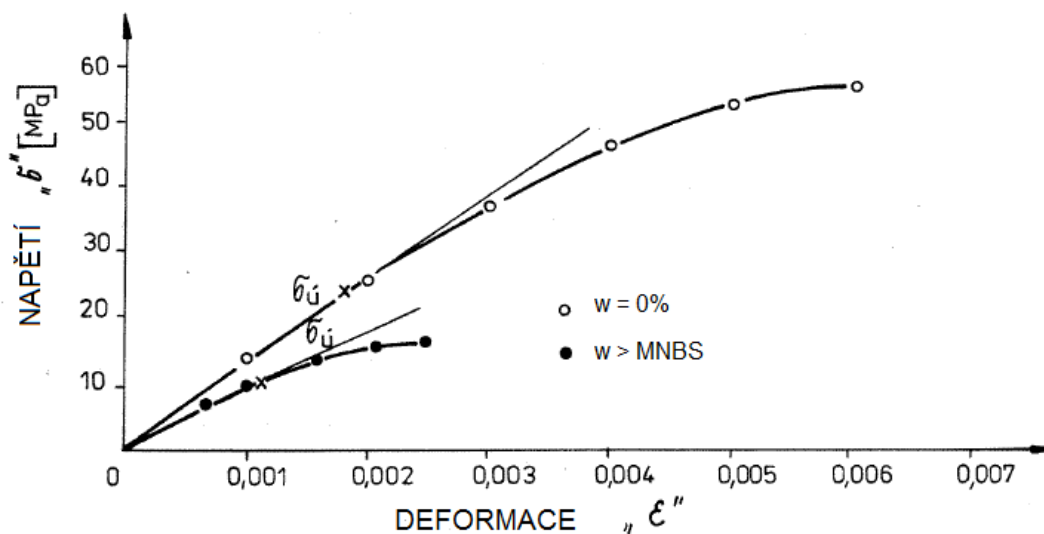
Je tedy zřejmé, že hustota je rozhodujícím faktorem v oblasti mechanických vlastností dřeva, ovšem tyto vlastnosti může ovlivňovat, tlumit, nebo zvýrazňovat struktura a stavba jednotlivých dřevin.

### **3.6.3. Vlhkost**

Vlhkost dřeva se mění v závislosti na tlaku a vlhkosti okolní atmosféry. V případě, že je těleso umístěno na místo s konstantním tlakem a vlhkostí, po čase dojde k vyrovnání těchto hodnot s okolními. Aby bylo dosaženo rovnovážného stavu, musí dřevo vlhkost buďto přijmout (adsorpce), nebo ztratit (desorpce). Tento jev je známý jako hystereze (Stamm A.J., 1964).

Vlhkost dřeva v čerstvém stavu čili těsně po jeho vytěžení se pohybuje v rozmezí od 30 do 300 %. Vlhkost čerstvého javoru se pohybuje v rozmezí od 80 do 90 %. Pokud vlhkost dřeva klesne pod mez nasycení buněčných stěn, začne se zmenšovat objem dřeva a mění se i mechanické vlastnosti dřeva. Obecně platí, že s úbytkem vody v buněčných stěnách roste pružnost a pevnost dřeva.

Při zatížení v tlaku rovnoběžně s vlákny je možné pozorovat na diagramu napětí-deformace značný rozdíl mezi vlhkostí  $w = 0 \%$  a vlhkostí nad mezí nasycení buněčných stěn. Dřevo v čerstvém stavu prokazuje téměř tři až osm krát nižší pevnost, deformace na mezi úměrnosti je až dvojnásobně menší a celková energie deformace téměř sedmkrát než u dřeva v absolutně suchém stavu. Při nárůstu vlhkosti o 1 % se pevnost v tlaku zhorší průměrně o 5 %. (Lexa et al., 1952).



Obr. 6: Vliv vlhkosti na mez pevnosti a deformaci při tlaku podél vláken

Se zvyšující se vlhkostí se pevnostní a pružnostní vlastnosti dřeva zhoršují, platí to ale pouze do meze nasycení buněčných stěn (MNBS). MNBS je stav, kdy je buněčná stěna plně nasycena vodou vázanou, lumen přitom neobsahuje žádnou vodu. Pokud vlhkost nad MNBS stále roste, jedná se už o vodu volnou a ta nemá na pevnost a pružnost dřeva takový zásadní vliv, jako voda vázaná. Dřevo rostoucího stromu má vlhkost vždy nad MNBS. (Tiemann, 1906).

Stamm A.J. (1965) uvádí rozdíly bodů nasycení zvláště u jednotlivých chemických složek dřeva. Bod nasycení celulózy se pohybuje v rozmezí od 28 do 30 %, u hemicelulózy se jedná o 60 až 80 % a u ligninu se toto číslo pohybuje od 10 do 28 %.

Existují dva způsoby na výpočet vlhkosti ve dřevě, jedná se o absolutní a relativní vlhkost. Obě možnosti se vyjadřují v % a vypočítají se podle následujícího vztahu:

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

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

Příčemž  $m_w$  je hmotnost vlhkého dřeva a  $m_0$  hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu. Rozdílem těchto dvou hodnot pak je hmotnost vody ve dřevě.

#### **3.6.4. Růstové podmínky**

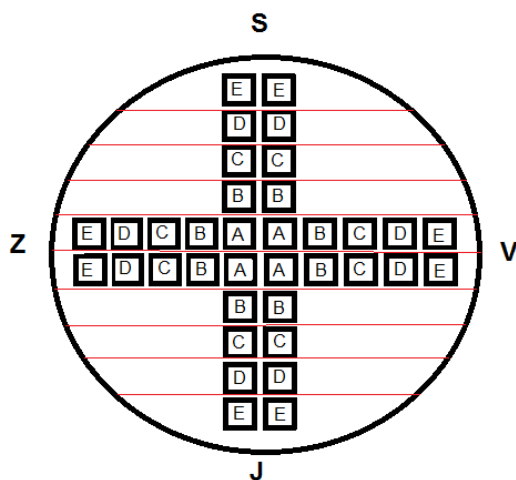
Variabilita vlastností dřeva je do značné míry ovlivněna růstovými podmínkami, jako je růstové stanoviště, živiny obsažené v půdě, nadmořská výška a podobně. Svoji roli hraje také konkurence jednotlivých stromů mezi sebou. Rozdíl vlastností je proto možné pozorovat u stromů, jenž rostou nad úrovní ostatních a těch, které během svého růstu bojují o každý paprsek slunce. Podobný rozdíl lze pozorovat i u stromů, které rostou samostatně ve srovnání se stromy rostoucími ve větším množství. Dalším faktorem je bezesporu teplota, tedy faktor, jenž je ovlivněn zejména zeměpisnou polohou a nadmořskou výškou stanoviště stromu (Panshin, de Zeeuw, 1980).

## 4. Metodika

### 4.1. Příprava zkušebních vzorků

Pro přípravu zkušebních vzorků na tuto práci byl použit jeden kmen javoru mléče (*Acer Platanoides L.*) z urbanizovaného prostředí. Pro jednodušší zacházení s kulatinou byl nakrácen na sedm dílů, přičemž pět špalků (1-5) bylo zhruba 85 cm dlouhých a zbylé dva (6,7) špalky byly kratší než 50 cm. Na všech kusech byly následně druhou skupinou změřeny akustické vlastnosti pro zhotovení jiné práce. Jelikož bylo potřeba vyrobit vzorky pro zkoušku na tlak a ohyb, bylo následně použito pouze pět nejdelších kusů. Na každém kusu bylo ihned po jeho zkrácení sprejem vyznačeno číslo, jenž znamenalo umístění ve kmeni po výšce. Dále zde bylo čarou naznačeno natočení vůči světovým stranám, aby bylo možné zjistit, zda existuje závislost mechanických vlastností dřeva vůči světovým stranám.

Pomocí pásové pily CTR 420 byly následně špalky nařezány na desky o tloušťce 30 mm tak, aby řez probíhal kolmo na čáru znázorňující sever. Bylo nutné vyřadit špalek číslo tři, jelikož obsahoval části kovu, které by při jeho řezání mohly poškodit pilu. Každá z desek byla řádně popsána, aby nedošlo k jejich záměně. Dalším krokem bylo získat z každé desky pouze tu část, která je přesně natočená k jedné ze světových stran. Pomocí kotoučové pily se tedy desky nařezaly na hranoly o šířce 30 mm, z nichž se vybraly jen ty potřebné kusy, zbytek hranolů nebyl použit. Taktéž každý hranolek bylo nutné pečlivě popsat, poznámka obsahovala číslo znázorňující číslo kmene (1,2,4,5), dále písmeno označující polohu od středu (A-střed až G-krajní část), dalším symbolem bylo písmeno znázorňující jednu ze světových stran (S, J, V, Z).



Obr. 7: Schématické znázornění polohy jednotlivých vzorků ve kmeni

Hranoly bylo následně nutné ohoblovat ze všech čtyř bočních stran, aby měly všechny vzorky čtvercové průřezové rozměry 20 × 20 mm. Takto upravené hranoly se nakonec na formátovací pile nařezaly na potřebné délky (300 mm pro vzorky na tah a 30 mm pro vzorky na tlak). U připravených zkušebních vzorků bylo potřeba zachovat jejich vlhkost, jelikož se jednalo o čerstvé dřevo, vzorky byly dočasně vloženy do nádob s vodou.

#### **4.2. Zkouška na tlak**

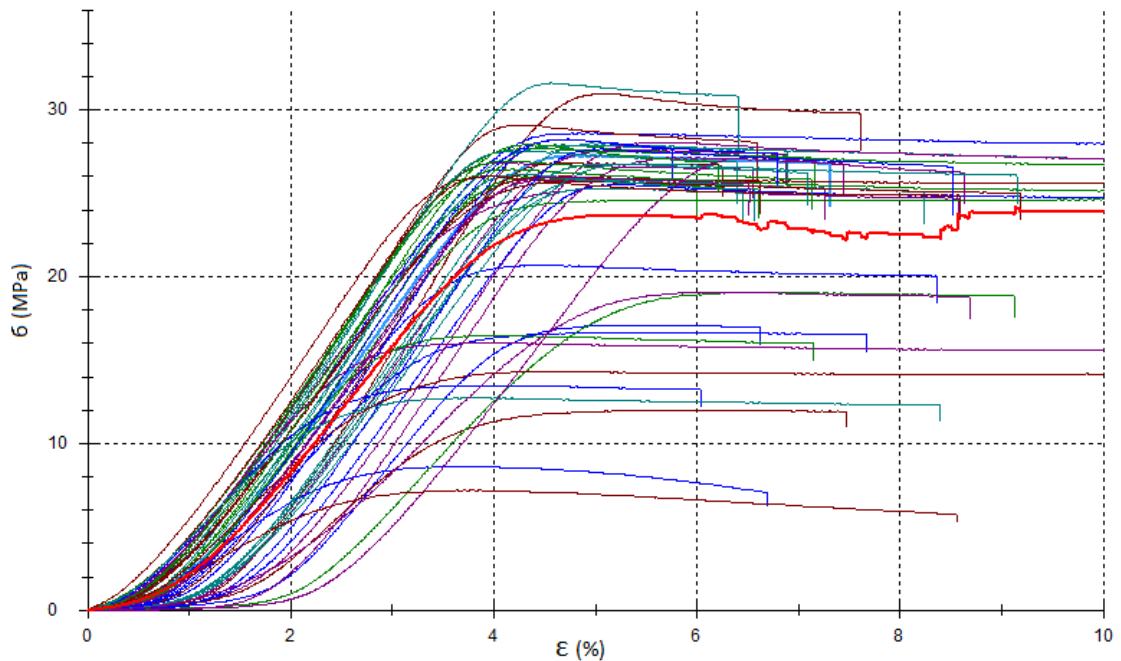
Zkouška byla prováděna podle norem ČSN 49 0110 – mez pevnosti v tlaku ve směru vláken a ČSN 49 0111 – metoda zjišťování modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken. Před samotným zkoušením bylo nutné vzorky vyndat z nádob a povrchově osušit. Následně byla u každého vzorku změřena jeho hmotnost na digitální váze Scaltec SBC 41 s přesností na 0,001 g, hodnoty byly zapisovány do počítačového programu TestXpert od společnosti Zwick. Rovněž zde byly uváděny rozměry vzorků, které byly změřeny pomocí digitálního posuvného měřítka Mituyoyo ABS 50 s přesností na 0,01mm. Samotná zkouška na tlak byla prováděna na zkušebním stroji Zwick 050, jehož příčník působí na tělesa shora silou až 50 kN, posuv horního příčníku lze regulovat od 0,001 do 500 mm/min.

Vzorek byl po zadání jeho rozměrů a hmotnosti programu usazen na vyznačené místo. Následně byl pomocí programu spuštěn stroj a vzorek byl příčníkem zatížen zatěžovací silou 10 N. Poté bylo třeba nastavit extenzometry tak, aby přiléhaly dvěma protějšími stranami ke vzorku a zkoumali tak posuvy, jenž vytváří vzorek během zatížení. Po nastavení extenzometrů bylo možné spustit samotné měření na tlak. Během zatěžování tělesa se na monitoru vykresloval diagram napětí-deformace. Proces byl automaticky ukončen při poklesu křivky o 20 % z maximálního napětí. Po ukončení zatížení vyjel příčník do své původní polohy a stejný postup testování byl prováděn na všech vzorcích. Výsledkem byly hodnoty modulu pružnosti E, meze pevnosti  $\sigma_p$ , poměrné deformace  $\varepsilon$  a práci W. Program dále vypočítal hustotu na základně zadání rozměrových hodnot a hmotnosti. Statické zpracování dat ve formátu „tra“ bylo převedeno do programu Microsoft Excel a dále zpracováno. Statistická analýza byla provedena pomocí programu STATISTICA.

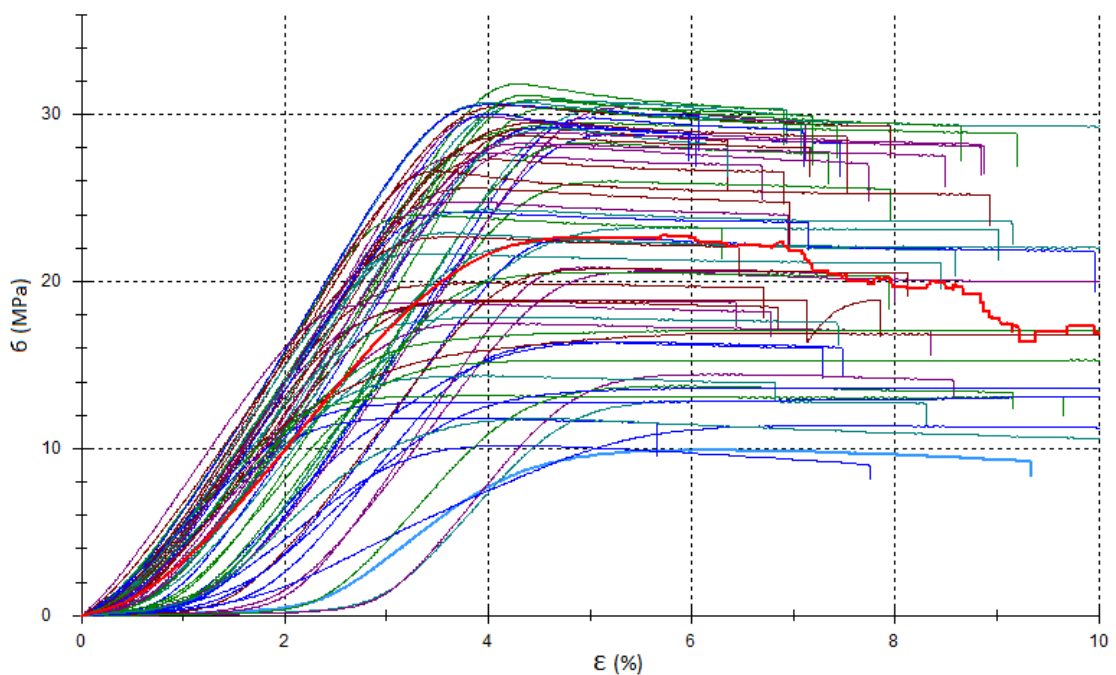
## 5. Výsledky

### 5.1. Pracovní diagramy

Prvními údaji získanými během testování na zkušebním stroji Zwick 050 byly pracovní diagramy napětí-deformace v programu testXpert. Na jednom diagramu jsou zobrazeny všechny zkoušky na tlak pro konkrétní výřez.

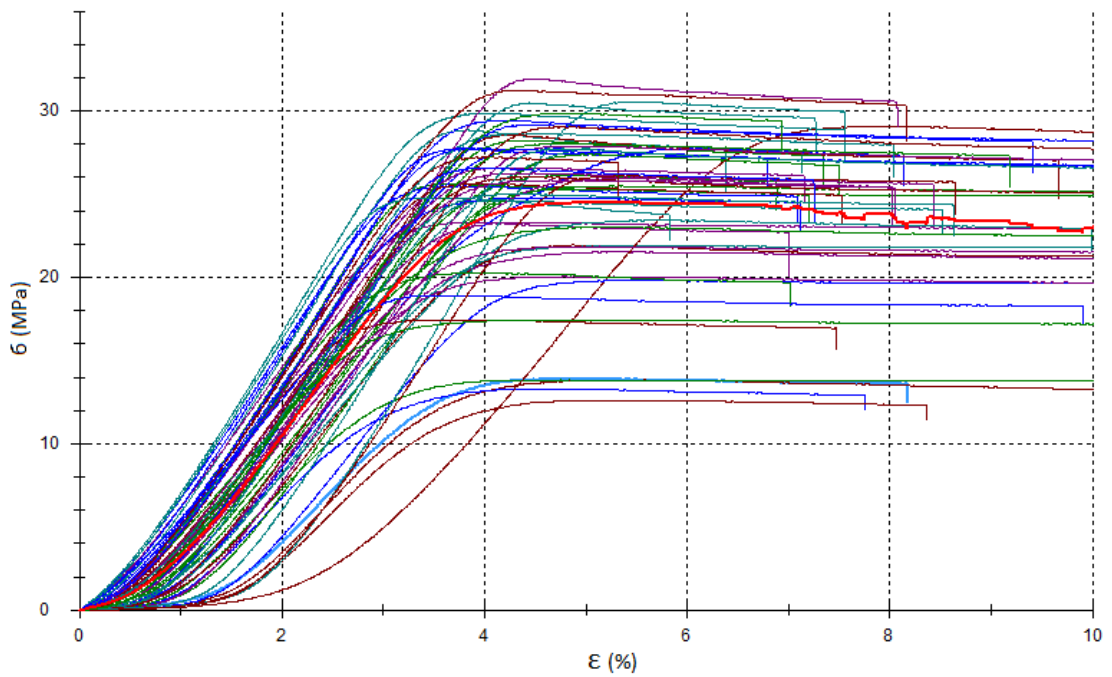


Obr. 8: pracovní diagram napětí-deformace pro výřez č.1

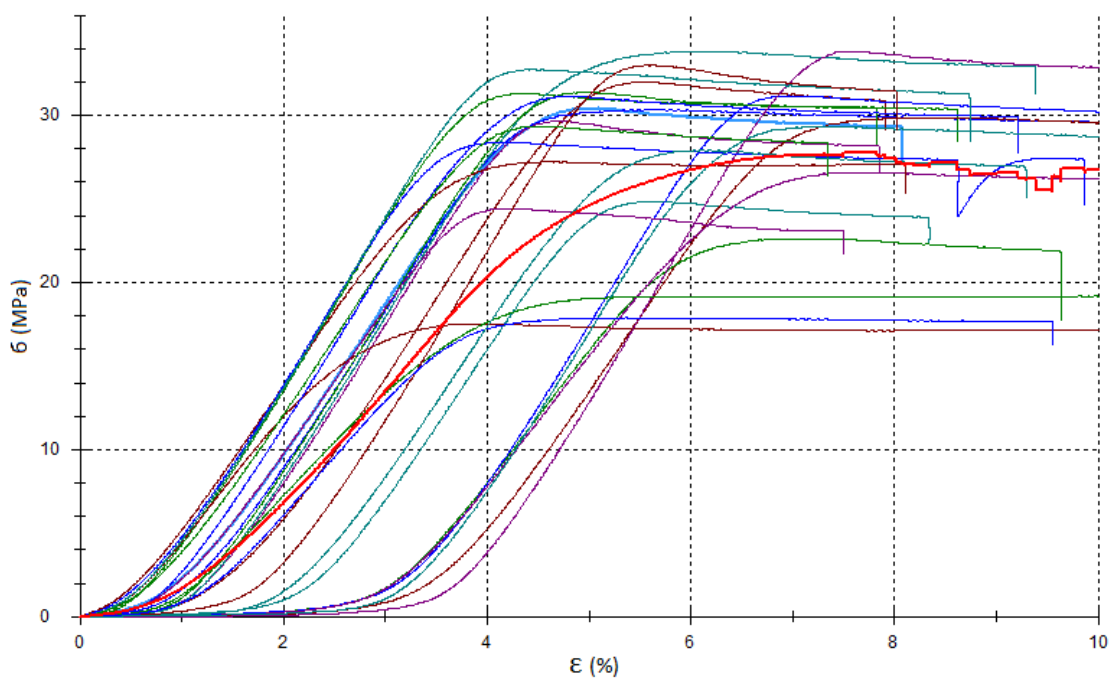


Obr. 9: pracovní diagram napětí-deformace pro výřez č.2





Obr. 10: pracovní diagram napětí-deformace pro výřez č.4



Obr. 8: pracovní diagram napětí-deformace pro výřez č.5

Tučné červené křivky v diagramech znázorňují průměrné hodnoty napětí a poměrné deformace (z příčnicku). Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u výřezu č. 5 (28,5 MPa), naopak nejnižší u č. 2 (23,9 MPa). Z diagramu u výřezu č. 5 je zřejmé, že je zde průběh napětí nejvíce pozvolný a dosahuje zde průměrné deformace na mezi pevnosti okolo 8 %, u č. 4 je to zhruba 7 % a u výřezů č. 1 a 2 je průměrná deformace okolo 6 %.

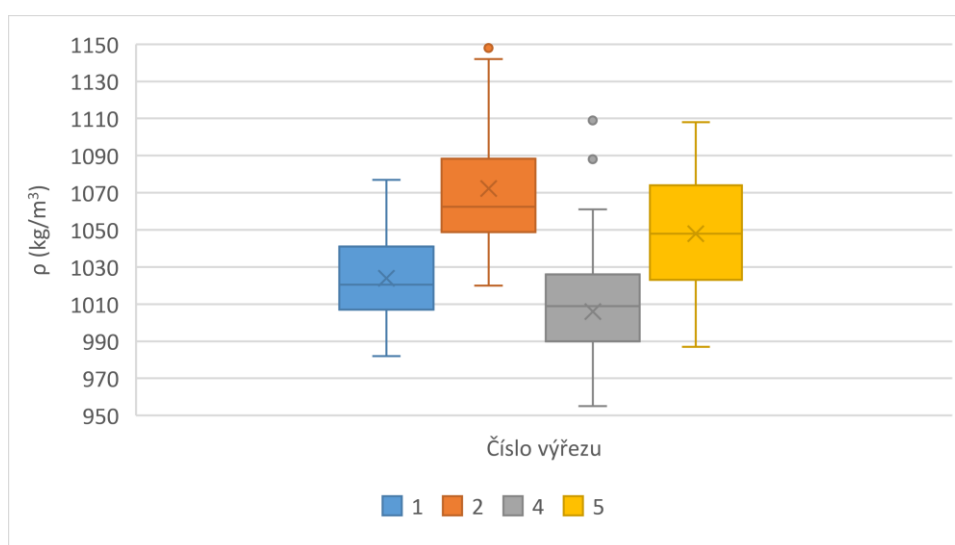
## 5.2. Porovnání vlastností po výšce kmene

### 5.2.1. Hustota dřeva

Při porovnávání vlastností po výšce kmene byly vyloučeny vzorky ze středu kmene, jelikož každý výřez neobsahoval stejný počet středových vzorků, mohlo by dojít ke zkreslení dat. Nejvyšší průměrná hodnota byla zaznamenána u výřezu č. 2, nejnižší u výřezu č. 4. Výřez č. 4 vykazuje nejvyšší rozdíl mezi minimem a maximem ( $341 \text{ kg/m}^3$ ) a nejvyšší variační koeficient (4,4%). Na základě jednofaktorové anovy byla zamítnuta hypotéza o středních hodnotách. Jednotlivé výřezy mají statisticky významný vliv na posuzované hodnoty. Střední hodnoty nelze považovat za stejné. Pomocí Tukeyho testu bylo zjištěno, že každý jednotlivý výřez se statisticky významně odlišuje od výřezů vedlejších. Výřez č. 2 tedy se tedy statisticky liší od výřezů č. 1 a č. 3. Výřez č. 3 se liší od č. 2 a č. 4.

Tab. 1: popisná statistika hodnot hustoty v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr ( $\text{kg/m}^3$ )	1024	1072.3	1005.9	1048
Počet hodnot (ks)	46	62	55	23
Medián ( $\text{kg/m}^3$ )	1020.5	1062.5	1009	1048
Směrodatná odchylka ( $\text{kg/m}^3$ )	23.01	35.24	44.67	29.73
Minimum ( $\text{kg/m}^3$ )	982	1020	768	987
Maximum ( $\text{kg/m}^3$ )	1077	1163	1109	1108
Rozdíl MIN-MAX ( $\text{kg/m}^3$ )	95	143	341	121
Variační koeficient (%)	2.2	3.3	4.4	2.8



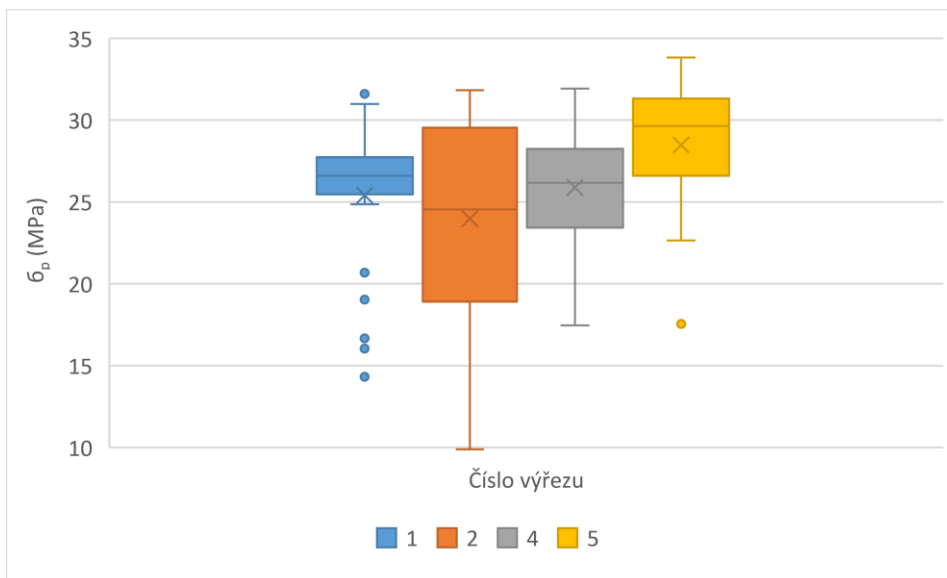
Obr. 9: krabicevý graf znázorňující hustoty jednotlivých výřezů

### 5.2.2. Mez pevnosti

Nejvyšší průměrné hodnoty meze pevnosti byly zaznamenány u výřezu č. 5, nejnižší u výřezu č. 2. Výřez č. 2 má nejvyšší rozmezí naměřených hodnot, variační koeficient zde činí 24,5 %. Na základě jednofaktorové anovy bylo zjištěno, že některá ze středních hodnot se významně odlišuje od ostatních. Pomocí Tukeyho testu se prokázalo, že se jedná o výřez č. 2, který obsahuje velké množství nízkých hodnot meze pevnosti. Nelze tedy s přesností určit závislost meze pevnosti na pozici po výšce kmene.

Tab. 2: popisná statistika meze pevnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr (MPa)	25.4	23.9	25.9	28.5
Počet hodnot (ks)	46	62	55	23
Medián (MPa)	26.6	24.6	26.2	29.3
Směrodatná odchylka (MPa)	3.97	5.97	3.41	4.41
Minimum (MPa)	14.3	9.9	17.5	17.6
Maximum (MPa)	31.6	31.8	31.9	33.8
Rozdíl MIN-MAX (MPa)	17.3	21.9	14.4	16.2
Variační koeficient (%)	15.6	24.9	13.2	15.5



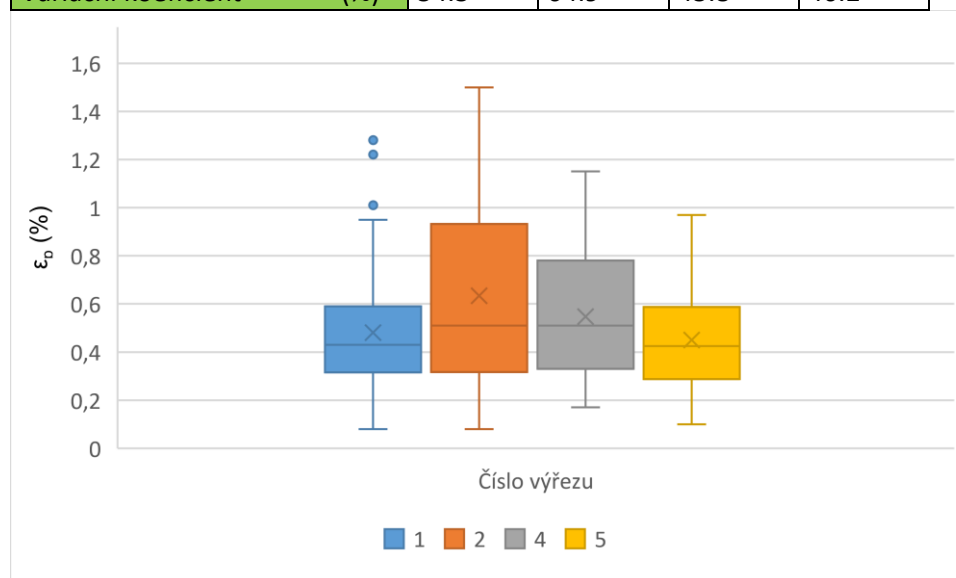
Obr. 10: hodnoty meze pevnosti v jednotlivých výřezech

### 5.2.3. Poměrná deformace na mezi pevnosti

Poměrná deformace na mezi pevnosti byla snímána pomocí extenzometru. Nejvyšší průměrné hodnoty vykazuje výřez č. 2 (0,633 %). U výřezu č. 2 byl navíc opět zaznamenán největší rozptyl hodnot, směrodatná odchylka činí 0,411 % a variační koeficient 64,9 %. Od výřezu č. 2 směrem nahoru po výšce kmene se deformace na mezi pevnosti snižuje. Analýza rozptylu hodnot prokázala, posuzovaný faktor v podobě pozice vzorků po výšce kmene má vliv na poměrnou deformaci na mezi pevnosti.

Tab. 3: popisná statistika poměrné deformace na mezi pevnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu		1	2	4	5
Aritmetický průměr (%)	(%)	0.481	0.633	0.547	0.451
Počet hodnot	(ks)	45	58	55	22
Medián (%)	(%)	0.43	0.51	0.51	0.375
Směrodatná odchylka (%)	(%)	0.261	0.411	0.251	0.208
Minimum (%)	(%)	0.08	0.08	0.17	0.1
Maximum (%)	(%)	1.28	2.02	1.15	0.97
Rozdíl MIN-MAX (%)	(%)	1.2	1.94	0.98	0.87
Variační koeficient (%)	(%)	54.3	64.9	45.8	46.2



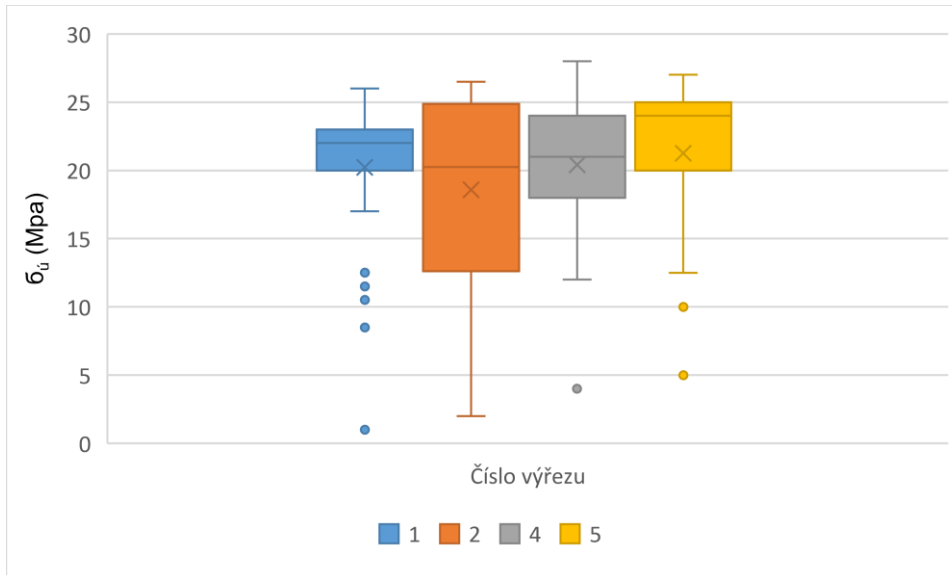
Obr. 114: hodnoty poměrné deformace na mezi pevnosti v jednotlivých výřezech

### 5.2.4. Mez úměrnosti

Napětí na mezi úměrnosti je znovu ovlivněno hodnotami z výřezu č. 2, u něhož bylo zaznamenáno velké množství poměrně nízkých hodnot. Minimální hodnota meze úměrnosti byla naměřena právě u č. 2 (6,5 MPa). Průměrné hodnoty a medián se zvětšují s rostoucí výškou, výjimkou je výřez č. 1, jehož průměrná hodnota (20,6 MPa) překračuje průměrnou hodnotu č. 2 (18,8 MPa).

Tab. 4: popisná statistika meze úměrnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr (MPa)	20.6	18.8	20.7	22.2
Počet hodnot (ks)	46	63	54	18
Medián (MPa)	22	20.75	21.25	24.25
Směrodatná odchylka (MPa)	4.34	6.13	3.65	4.48
Minimum (MPa)	8.5	6.5	12	10
Maximum (MPa)	26	26.5	28	27
Rozdíl MIN-MAX (MPa)	17.5	20	16	17
Variační koeficient (%)	21.1	32.5	17.6	20.2



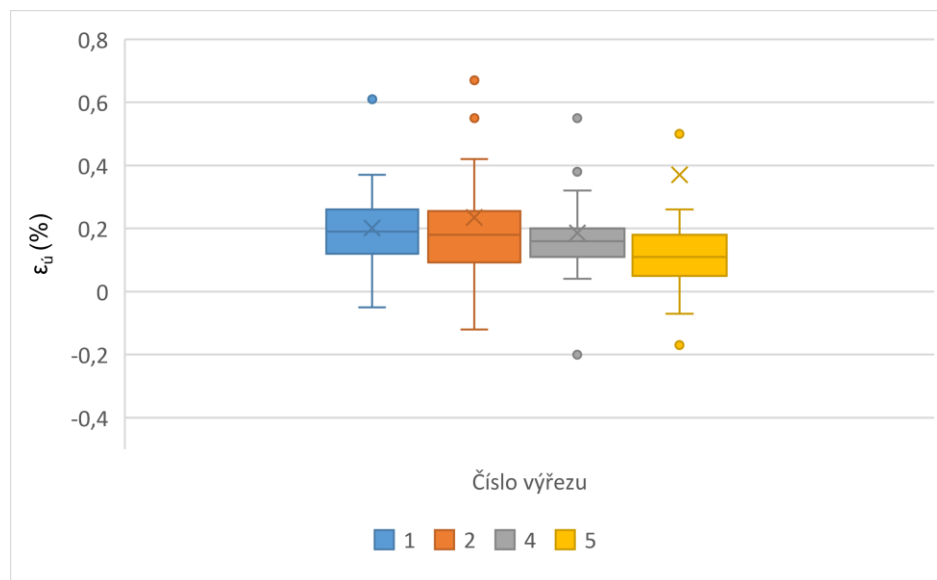
Obr. 15: hodnoty meze úměrnosti v jednotlivých výřezích

### 5.2.5. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr)

Nejvyšší průměrná deformace na mezi úměrnosti byla naměřena opět na výřezu č. 2 (0,21 %), nejnižší u č.5 (0,113). U všech výřezů byl zaznamenán poměrně vysoký variační koeficient (61,4 % až 216,4 %). Záporné hodnoty jsou z důsledku snímání pomocí extenzometru, výsledky se proto nedají považovat za zcela přesné. Z krabicového grafu je patrné, že hodnoty mezi 25 % a 75 % kvantilem s rostoucí výškou kmene klesají. Šetřením pomocí jednofaktorové anovy se prokázalo, že střední hodnoty mají statisticky významný rozdíl, výřez č. 1 se statisticky významně odlišuje od č. 2 a č. 4.

Tab. 5: popisná statistika poměrné deformace na mezi úměrnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr (%)	0.184	0.21	0.115	0.113
Počet hodnot (ks)	46	63	54	18
Medián (%)	0.185	0.175	0.16	0.105
Směrodatná odchylka (%)	0.113	0.199	0.249	0.135
Minimum (%)	-0.05	-0.12	-1.01	-0.17
Maximum (%)	0.61	0.98	0.55	0.5
Rozdíl MIN-MAX (%)	0.66	1.1	1.56	0.67
Variační koeficient (%)	61.4	96.3	216.4	120.1



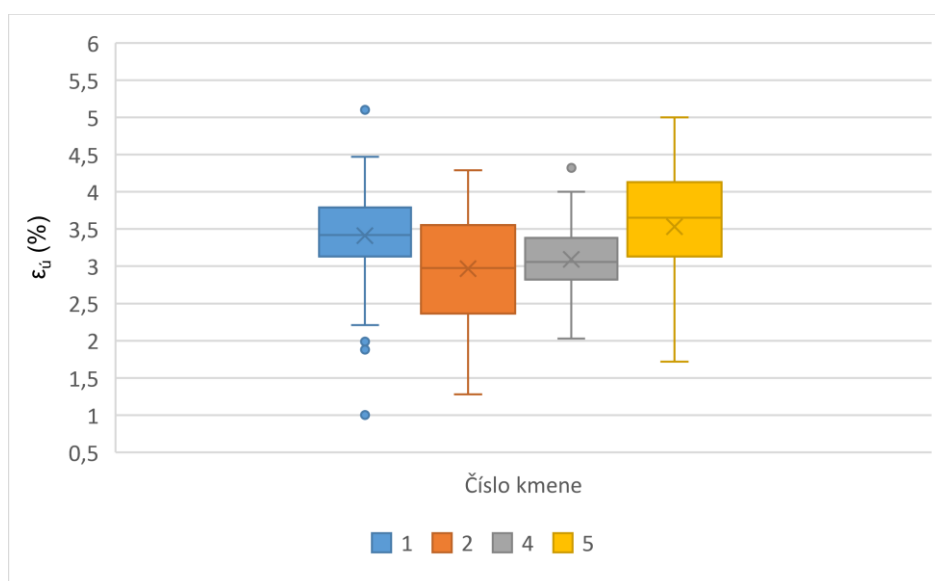
Obr. 16: hodnoty poměrné deformace na mezi úměrnosti u jednotlivých výřezů

### 5.2.6. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník)

Deformace naměřená pomocí příčníku ukazuje hodnoty deformace ve zcela jiných řádech, než u hodnot naměřených pomocí extenzometru (20 až 30krát vyšší). Variační koeficient je v tomto případě daleko menší, lze předpokládat, že se jedná o přesnější metodu měření deformace. U výřezů č. 2 a č. 4 byly zaznamenány nižší průměrné hodnoty (2,98 % a 3,077 %), než u spodního výřezu č. 1 a horního výřezu č. 5 (3,463 % a 3,451 %). Krabicový graf poukazuje na to, že hodnoty umístěné ve 25 % až 75 % kvantilu se zvyšují s rostoucí výškou, výjimkou je spodní část kmene. Analýza rozptylu a následný Tukeyho test prokázali, že u výřezu č. 1 je statisticky významný rozdíl, a to s výřezy č. 2 a č. 4.

Tab. 6: popisná statistika poměrné deformace na mezi úměrnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu		1	2	4	5
Aritmetický průměr (%)	(%)	3.463	2.98	3.077	3.451
Počet hodnot	(ks)	46	63	54	18
Medián (%)	(%)	3.465	2.985	3.06	3.475
Směrodatná odchylka (%)	(%)	0.593	0.741	0.452	0.659
Minimum (%)	(%)	1.88	1.28	2.03	1.72
Maximum (%)	(%)	5.1	4.29	4.32	4.51
Rozdíl MIN-MAX (%)	(%)	3.22	3.01	2.29	2.79
Variační koeficient (%)	(%)	17.1	24.9	14.7	19.1



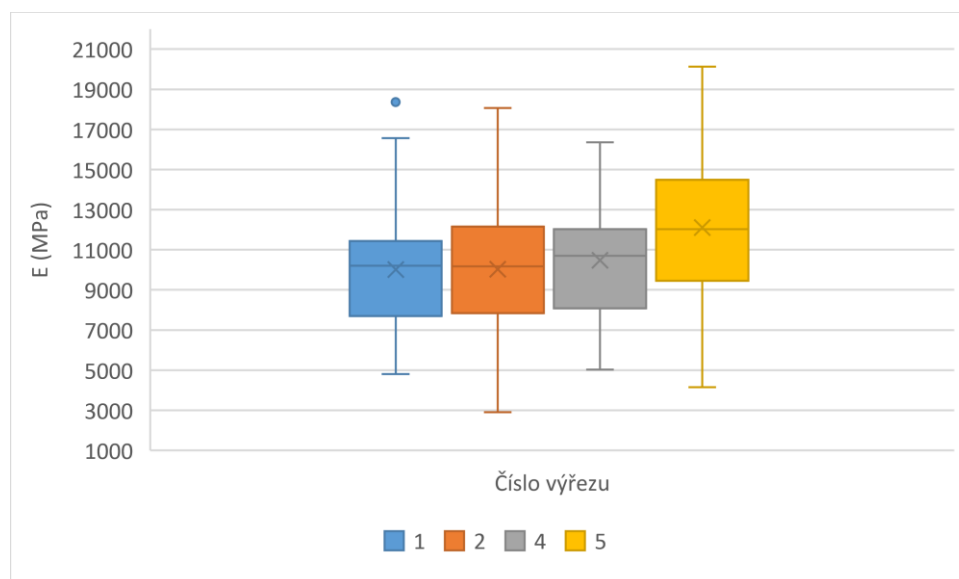
Obr. 127: hodnoty poměrné deformace na mezi úměrnosti u jednotlivých výřezů

### 5.2.7. Modul pružnosti

Moduly pružnosti u výřezů č. 1 a č. 2 jsou velmi podobné (100015,5 MPa a 10021,4 MPa). Podle průměrných hodnot lze podotknout, že modul pružnosti roste po výšce kmene. Za nejpřesnější lze považovat hodnoty naměřené u výřezu č. 4, rozdíl minima a maxima zde činí 11325,5 MPa a variační koeficient 26 %. Nejvyšší rozptyl hodnot je u č. 5, směrodatná odchylka je zde 3838,37 MPa. Jednofaktorová anova prokázala statistický významný rozdíl středních hodnot. Dá se tedy předpokládat, že pozice po výšce kmene ovlivňuje modul pružnosti.

Tab. 7: popisná statistika modulu pružnosti v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr (MPa)	10015.5	10021.4	10481.2	12113.9
Počet hodnot (ks)	46	62	55	23
Medián (MPa)	10200.2	10170.5	10697.9	12742.9
Směrodatná odchylka (MPa)	2851.64	3157.75	2726.29	3838.37
Minimum (MPa)	4801.2	2899.6	5029.2	4150.1
Maximum (MPa)	18358.3	18063.9	16354.8	20131.6
Rozdíl MIN-MAX (MPa)	13557.1	15164.3	11325.5	15981.5
Variační koeficient (%)	28.5	31.5	26	31.7



Obr. 13: hodnoty modulu pružnosti u jednotlivých výřezů

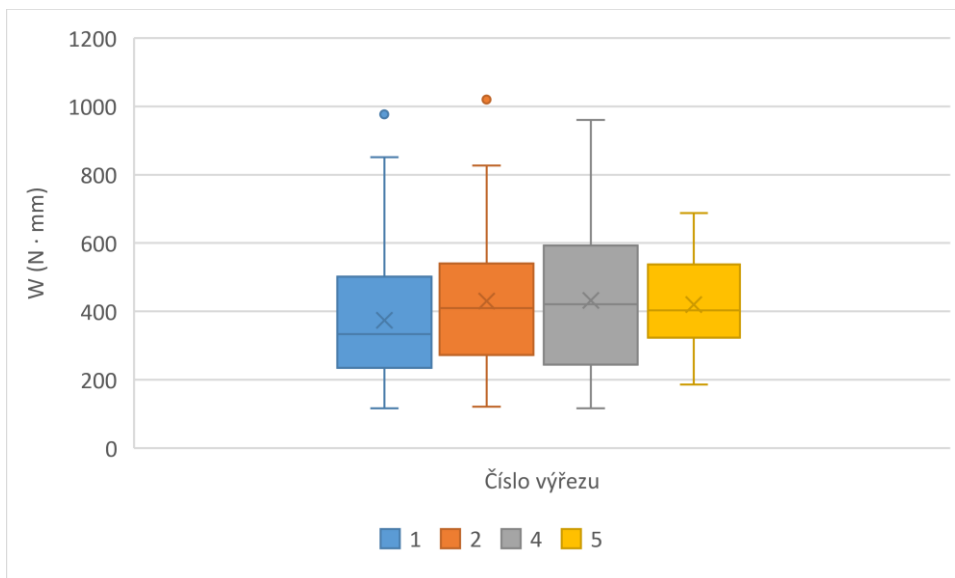


### 5.2.8. Práce

Nejvyšší průměrná hodnota práce byla zaznamenána u výřezu č. 4 (432,2 N · mm). Nejnižší průměrná hodnota je u spodního výřezu č. 1 (374,2 %). Nejmenší variační koeficient je u výřezu č. 5 (33,1 %). Na základě statistického zpracování pomocí jednofaktorové anovy nebyla zamítnuta hypotéza o shodných středních hodnotách, dá se tedy předpokládat, že posuzovaný faktor v podobě polohy po výšce kmene nemá žádný vliv na střední hodnoty zkoumané veličiny práce.

Tab. 8: popisná statistika práce v závislosti na výšce

Číslo výřezu	1	2	4	5
Aritmetický průměr (N · mm)	374.2	430.1	432.2	419.8
Počet hodnot (ks)	45	56	55	22
Medián (N · mm)	333.57	409.21	421.21	402.47
Směrodatná odchylka (N · mm)	179.19	193.87	209.39	139.07
Minimum (N · mm)	116.18	120.81	116.31	186.35
Maximum (N · mm)	976.72	1019.86	959.96	687.5
Rozdíl MIN-MAX (N · mm)	860.54	899.05	843.65	501.15
Variační koeficient (%)	47.9	45.1	48.4	33.1



Obr. 19: hodnoty práce u jednotlivých výřezů

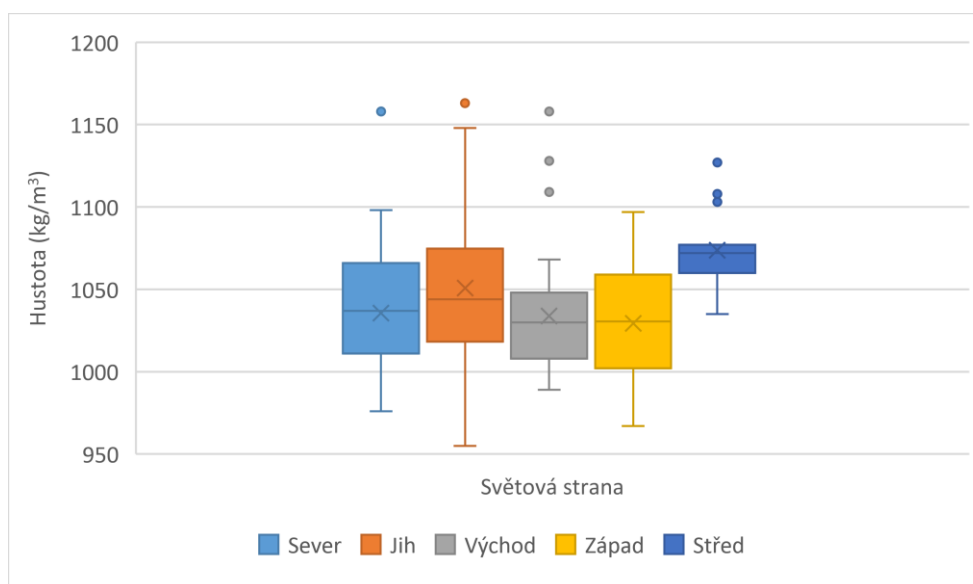
## 5.3. Porovnání vlastností po světových stranách

### 5.3.1. Hustota dřeva

Průměrné hodnoty hustoty v závislosti k jednotlivým světovým stranám nejsou významně odlišné. Největší variace hodnot je u vzorků ze severní strany, kde je variační koeficient 5,2 %, naopak nejmenší rozdíly hodnot jsou zaznamenány u dřeva ze středové části kmene, variační koeficient je zde 2,2 %. Variabilita hodnot hustoty v závislosti na světových stranách je dále graficky znázorněna na krabicovém grafu (obr. 9). Na základě jednofaktorové anovy (analýzy rozptylu) byla zamítnuta hypotéza o shodných středních hodnotách. Je tedy zřejmé, že některé ze středních hodnot se navzájem statisticky liší. Pomocí Tukeyho metody mnohonásobného porovnání pro nestejný počet hodnot bylo prokázáno, že statisticky významné rozdíly středních hodnot ( $\alpha=0,05$ ) jsou mezi vzorky Západ a Střed.

Tab. 9: Popisná statistika hustoty v závislosti ke světovým stranám

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (kg/m <sup>3</sup> )	1035.5	1050.8	1033.8	1029.3	1073.8
Počet hodnot (ks)	47	52	37	50	15
Medián (kg/m <sup>3</sup> )	1037	1044	1030	1030.5	1072
Směrodatná odchylka (kg/m <sup>3</sup> )	53.57	46.52	35.63	37.02	23.13
Minimum (kg/m <sup>3</sup> )	768	955	989	909	1035
Maximum (kg/m <sup>3</sup> )	1158	1163	1158	1097	1127
Variační koeficient (%)	5.2	4.4	3.4	3.5	2.2



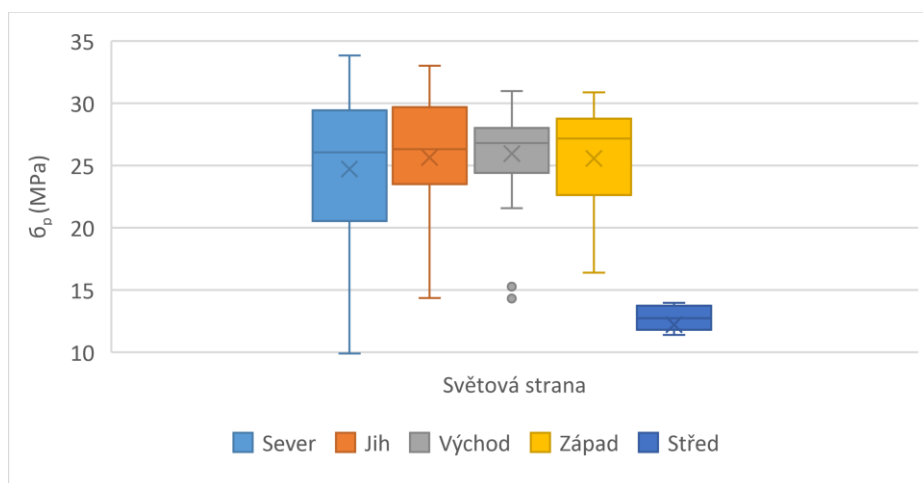
Obr. 14: hodnoty hustoty v závislosti na jednotlivých světových stranách

### 5.3.2. Mez pevnosti

Z tabulky 2 je patrné, že ani u hodnot meze pevnosti nejsou významné rozdíly mezi průměrnými hodnotami jednotlivých světových stran. Průměrné hodnoty u čtyř světových stran jsou v rozmezí 24,7 až 25,9 MPa. Značný rozdíl je pouze u vzorků ze středu kmene, u kterého je průměrná hodnota až dvakrát menší, než u ostatních měřených částí (12,2 MPa). Největší variabilitu hodnot vykazují vzorky Sever (23,9 %), minimální hodnoty meze pevnosti naměřená v této části je 9,89 MPa a maximální 33,83 MPa. Na Obr. 10 je zřejmé, že aritmetický průměr (na grafu značen křížkem v krabici) není výrazně odlišný od mediánu hodnot (vodorovná čára v krabici). Pomocí jednofaktorové anovy byla zamítnuta nulová hypotéza středních hodnot jednotlivých částí. Na základě Tukeyho mnohonásobného porovnání se zjistilo, že hodnoty ze středu kmene jsou statisticky významně odlišné od zbývajících hodnot. V případě středu se však jednalo o malý počet naměřených hodnot (15), vzniklo tak velké rozpětí intervalu spolehlivosti a výsledky nelze považovat za zcela objektivní. Mezi jednotlivými světovými stranami však nenastal statisticky významný rozdíl. Dá se tedy předpokládat, že orientace vůči světové straně nemá na mez pevnosti zásadní vliv.

Tab. 10: popisná statistika meze pevnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (MPa)	24.7	25.6	25.9	25.6	12.2
Počet hodnot (ks)	47	52	37	50	15
Medián (MPa)	26.04	26.30	26.79	27.15	12.73
Směrodatná odchylka (MPa)	5.91	5.04	3.48	4.31	1.89
Minimum (MPa)	9.89	14.36	14.32	16.38	7.18
Maximum (MPa)	33.83	33.01	30.98	30.88	13.97
Variační koeficient (%)	23.9	19.6	13.4	16.9	15.5



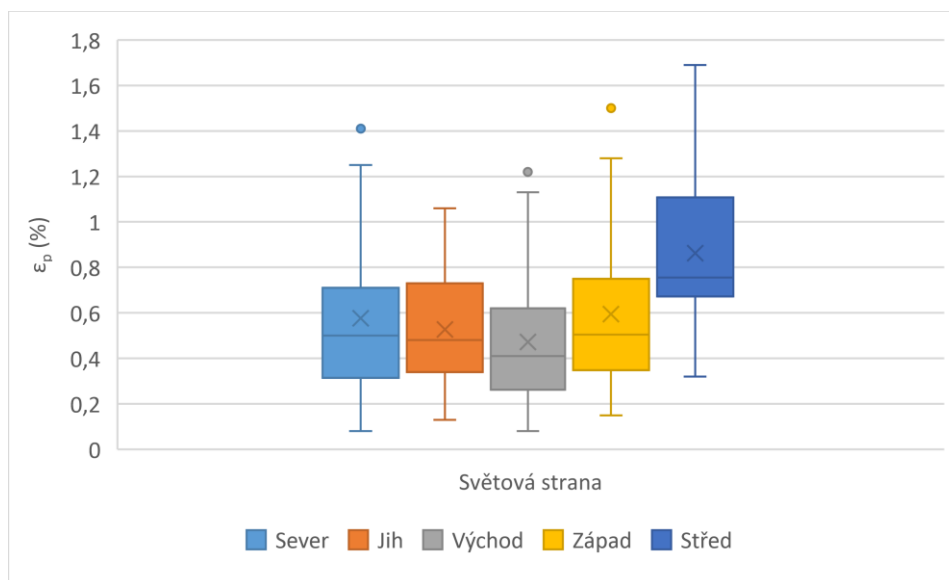
Obr. 15: hodnoty meze pevnosti u jednotlivých světových stran

### 5.3.3. Poměrná deformace na mezi pevnosti

K nejvyšší poměrné deformaci v průměru dochází ve středové části kmene (0,863 %), k nejmenšímu ve východní části (0,473 %). Míra rozptylu hodnot od průměrné hodnoty (směrodatná odchylka) je nejmenší u jihu (0,27 %) a největší u západu (0,37 %). Pomocí jednofaktorové anovy a následného Tukeyho testu bylo prokázáno, že středová část se statisticky významně odlišuje jižní a východní části. Jednotlivé části z různých světových stran však vůči sobě nevykazují rozdíl středních hodnot.

Tab. 11: popisná statistika deformace na mezi pevnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (%)	0.577	0.527	0.473	0.594	0.863
Počet hodnot (ks)	45	51	36	48	14
Medián (%)	0.5	0.5	0.4	0.5	0.8
Směrodatná odchylka (%)	0.32	0.27	0.29	0.37	0.35
Minimum (%)	0.08	0.13	0.08	0.15	0.32
Maximum (%)	1.43	1.06	1.22	2.02	1.69
Variační koeficient (%)	55.8	50.5	60.5	61.9	40.4



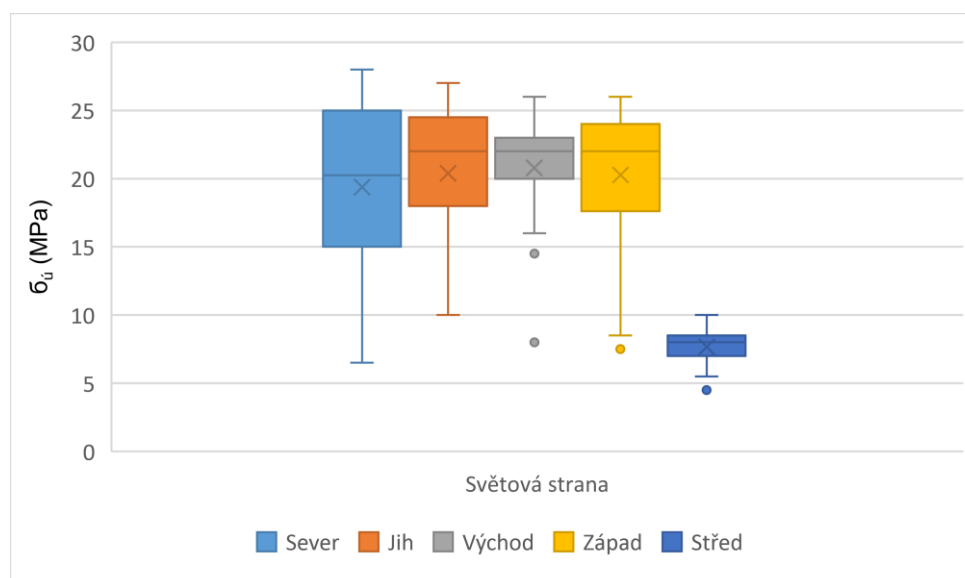
Obr. 16: hodnoty poměrné deformace na mezi pevnosti u jednotlivých světových stran

### 5.3.4. Mez úměrnosti

Průměrné hodnoty napětí na mezi úměrnosti jsou zhruba o 20 % nižší než hodnoty u meze pevnosti. V případě středové části se jedná o rozdíl téměř 40 % ( $\sigma_p=12,212$  MPa,  $\bar{\sigma}_u=7,667$  MPa). Je zde poměrně vysoká variabilita hodnot u jednotlivých částí. V případě severu je variační koeficient nejvyšší a to 30,4 %, nejmenší variační koeficient je u vzorků ze středu kmene, v tomto případě se však jedná o menší počet zkoumaných vzorků. Analýza rozptylu poukazuje na to, že střední hodnoty u čtyř světových stran nejsou navzájem statisticky odlišné. Na významný rozdíl ( $p < \alpha$ ) poukazuje Tukeyho metoda mezi střední hodnotou ze středové části ve srovnání s ostatními částmi kmene.

Tab. 12: popisná statistika meze úměrnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (MPa)	19.4	20.4	20.8	20.3	7.7
Počet hodnot (ks)	44	51	34	48	15
Medián (MPa)	20.25	22	22	22	8
Směrodatná odchylka (MPa)	5.88	5.06	4.02	4.87	1.42
Minimum (MPa)	6.5	10	8	7.5	4.5
Maximum (MPa)	28	27	26	26	10
Variační koeficient (%)	30.4	24.8	19.3	24	18.5



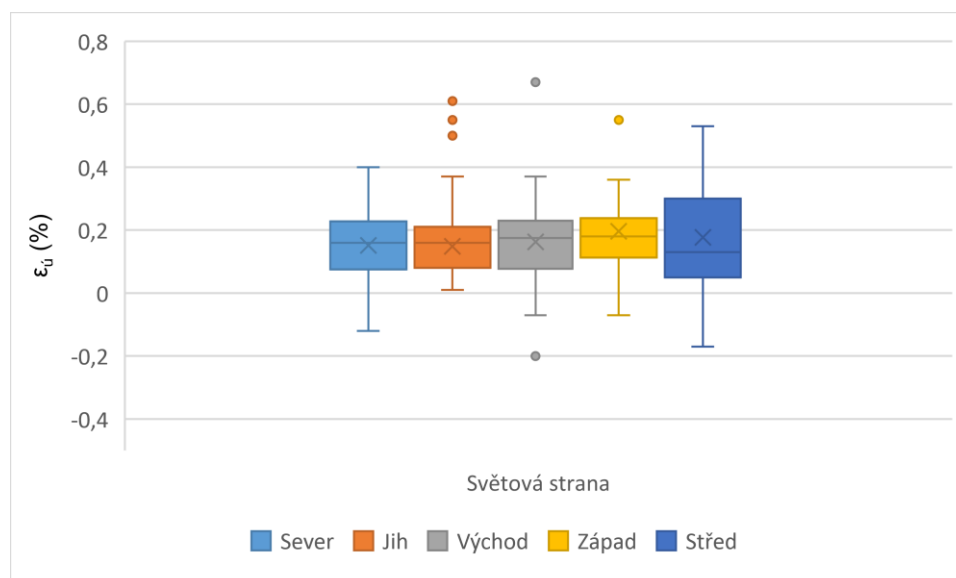
Obr. 17: hodnoty meze úměrnosti u jednotlivých světových stran

### 5.3.5. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr)

K nejvyšší poměrné deformaci na mezi úměrnosti dochází v průměru na západní straně kmene (0,197 %), nejmenší průměrná hodnota je na jižní straně (0,148 %). Medián hodnot poukazuje na to, že u všech světových stran se jedná o velmi podobné hodnoty deformace. Nejvyšší hodnotu mezi minimem a maximem obsahují vzorky ze severní strany, variabilní koeficient zde činí 160,6 %. Na krabicovém grafu je patrné, že největší rozpětí hodnot, které jsou ve 25 % až 75 % kvantilu obsahují vzorky ze středu kmene. Šetřením pomocí jednofaktorové anovy nelze zamítnout hypotézu a shodnosti středních hodnot. Posuzovaný faktor v podobě světové strany tedy nemá významný vliv na poměrnou deformaci na mezi úměrnosti.

Tab. 13: popisná statistika deformace na mezi úměrnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (%)	0.151	0.148	0.162	0.197	0.177
Počet hodnot (ks)	44	51	34	48	15
Medián (%)	0.16	0.16	0.18	0.18	0.13
Směrodatná odchylka (%)	0.24	0.22	0.15	0.15	0.18
Minimum (%)	-1.01	-0.85	-0.2	-0.07	-0.17
Maximum (%)	0.98	0.61	0.67	0.98	0.53
Variační koeficient (%)	160.6	147.3	91.01	75.45	100.55



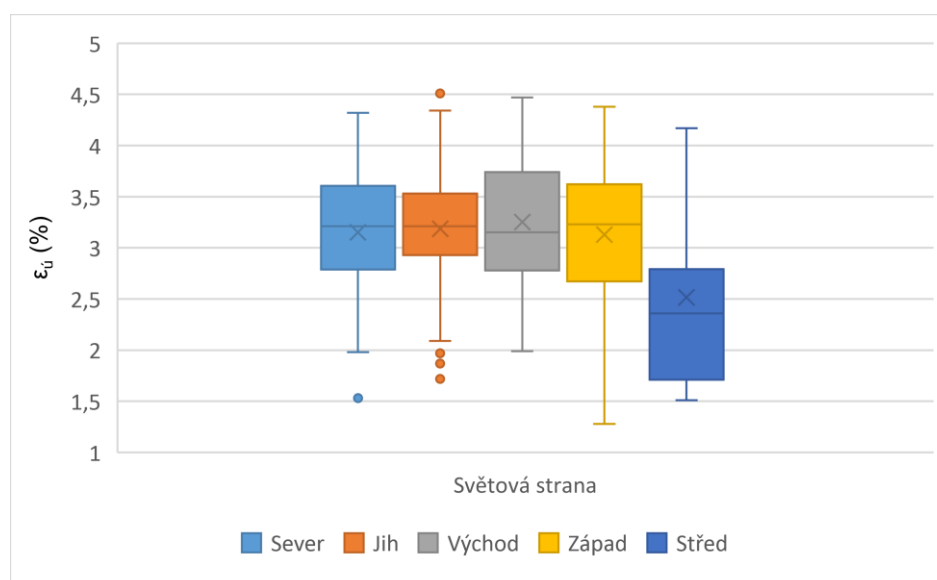
Obr. 18: hodnoty poměrné deformace na mezi úměrnosti u jednotlivých světových stran

### 5.3.6. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník)

Průměrné hodnoty poměrných deformací na mezi úměrnosti jsou u všech světových stran podobné, nejvyšší průměrnou hodnotu má východ (3,252 %), nejmenší je v západní části (3,128 %). Středová část vykazuje více odlišnou průměrnou hodnotu (2,517 %), než u zbylých částí kmene. Poměrná deformace na mezi úměrnosti převzatá z příčnicku vykazuje poměrně nízký variační koeficient (18,5 % až 33,3 %) v porovnání s deformací zjištěnou pomocí extenzometru (75,45 % až 160,6 %). Tukeyho test prokázal významný rozdíl středních hodnot pouze mezi hodnotami ze středu a z východní části kmene. U zbylých částí nebyl nalezen statisticky významný rozdíl. Nelze tedy prokázat vliv světové strany na poměrnou deformaci na mezi úměrnosti.

Tab. 14: popisná statistika deformace na mezi úměrnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (MPa)	3.152	3.186	3.252	3.128	2.517
Počet hodnot (ks)	44	51	34	48	15
Medián (MPa)	3.21	3.21	3.15	3.23	2.36
Směrodatná odchylka (MPa)	0.637	0.640	0.602	0.720	0.838
Minimum (MPa)	1.53	1.72	1.99	1.28	1.51
Maximum (MPa)	4.32	4.51	4.47	5.1	4.17
Variační koeficient (%)	20.2	20.1	18.5	23	33.3



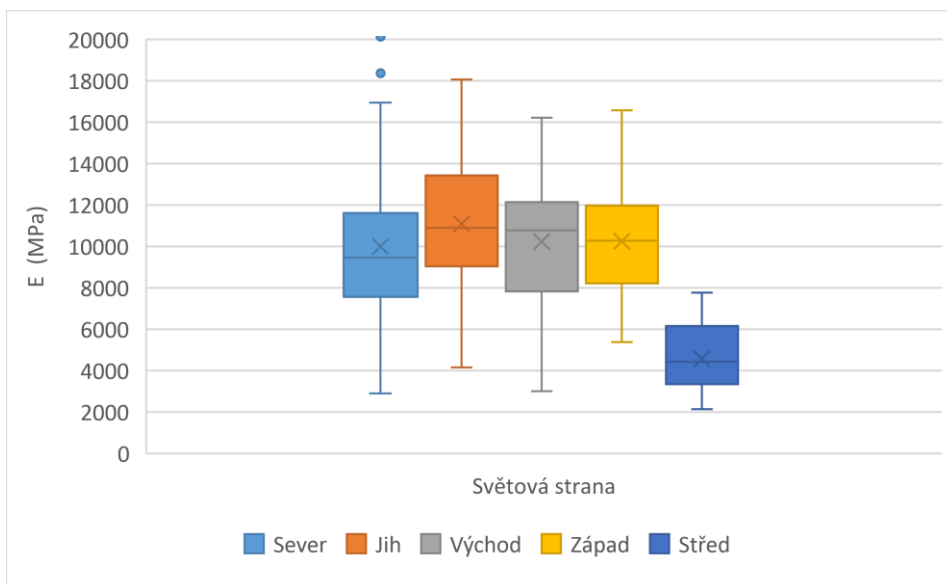
Obr. 19: hodnoty poměrné deformace na mezi úměrnosti u jednotlivých světových stran

### 5.3.7. Modul pružnosti

Nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti je ve středu kmene (4562,104 MPa), naopak nejvyšší je na západní části kmene (10247,76 MPa). Mezi středními hodnotami jednotlivých částí však není statisticky významný rozdíl, pouze střed je statisticky významně odlišný od zbylých částí. Nejvyšší rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je u severu (2899,58 až 20131,64 MPa), nejmenší rozdíl hodnot je naopak ve středu kmene (2131,59 až 7759,44 MPa).

Tab. 15: popisná statistika modulu pružnosti v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (MPa)	9996.9	11082.7	10232.1	10247.8	4562.1
Počet hodnot (ks)	47	52	37	50	15
Medián (MPa)	9454.9	10900.6	10773.8	10268.2	4434.5
Směrodatná odchylka (MPa)	3598.06	3229.87	2701.69	2714.72	1483.44
Minimum (MPa)	2899.58	4150.09	2994.27	5374.33	2131.59
Maximum (MPa)	20131.64	18063.91	16216.43	16568.38	7759.44
Variační koeficient (%)	35.9	29.1	26.4	26.5	32.5



Obr. 20: hodnoty modulu pružnosti u jednotlivých světových stran

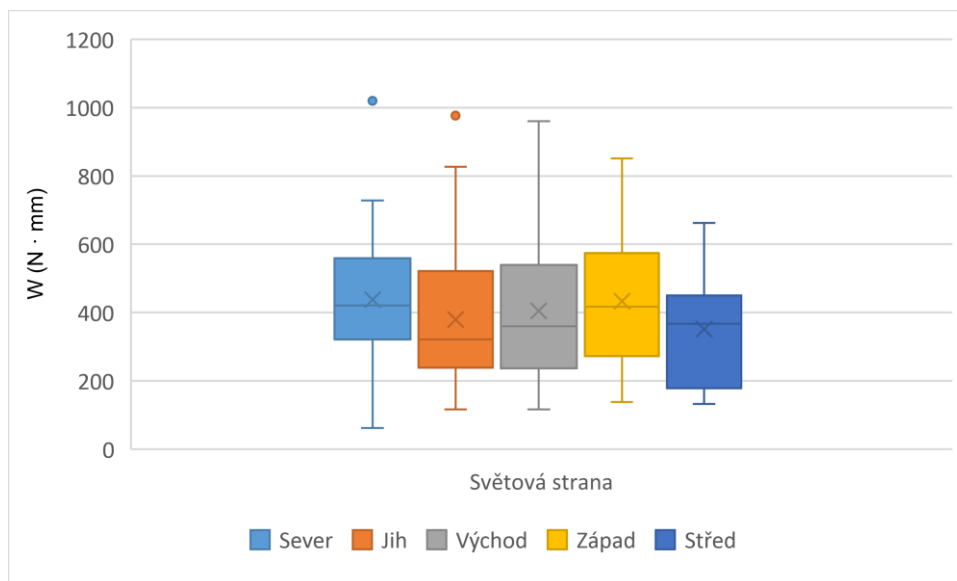


### 5.3.8. Práce

Středová část kmene vykazuje nejnižší průměrnou hodnotu práce (351,6 N · mm). Mezi částmi ze světových stran byla nejvyšší průměrná hodnota zjištěna u severní části (438,1 N · mm), naopak nejnižší u jižní části (379,6 N · mm). Na základě jednofaktorové analýzy se prokázalo, že posuzovaný faktor v podobě světové strany nemá statisticky významný vliv na zkoumanou veličinu, v tomto případě práci.

Tab. 16: popisná statistika práce v závislosti na světových stranách

Světová strana	Sever	Jih	Východ	Západ	Střed
Aritmetický průměr (N · mm)	438.1	379.6	404.9	432.7	351.6
Počet hodnot (ks)	45	51	36	47	14
Medián (N · mm)	420.5	320.9	360.3	417.1	367.3
Směrodatná odchylka (N · mm)	177.31	185.97	209.79	192.76	156.01
Minimum (N · mm)	61.9	116.2	116.3	138.1	132.7
Maximum (N · mm)	1019.9	976.7	959.9	851.2	662.2
Rozdíl MIN-MAX (N · mm)	958	860.5	843.6	713.1	529.5
Variační koeficient (%)	40.5	48.9	51.8	44.5	44.4



Obr. 21: hodnoty práce u jednotlivých světových stran

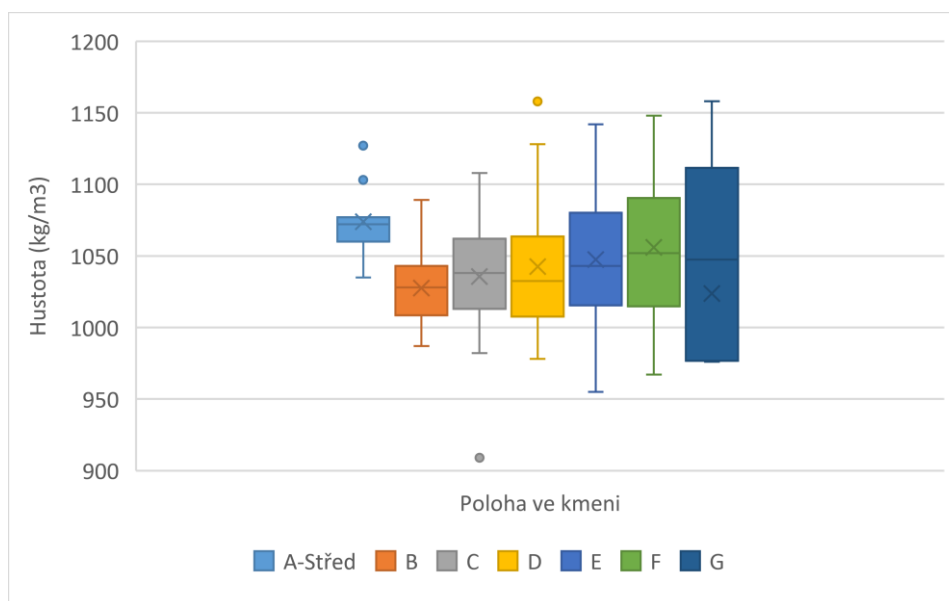
## 5.4. Porovnání vlastností po poloměru kmene

### 5.4.1. Hustota dřeva

Nejvyšší průměrná hustota byla naměřena ve středu kmene „A“ ( $1073,8 \text{ kg/m}^3$ ). Od pozice „B“, tedy těsně u středu kmene se hustota směrem ke kambiu postupně zvyšuje, hustota na krajní části kmene je ovšem nejnižší ( $1023,8 \text{ kg/m}^3$ ). V případě krajní části „G“ však proběhlo měření pouze u osmi vzorků a variační koeficient je zde vyšší, než v ostatních případech (11,1 %). Na krabicovém grafu je zřetelné, že rozpětí hodnot v rozmezí 25 % a 75 % kvantilu se zvyšuje směrem ke kambiu. Následné statistická analýza prokázala, že hypotéza o shodných středních hodnotách je zamítnuta. Dá se tedy předpokládat, že poloha v poloměru kmene má staticky významný vliv na hustotu dřeva.

Tab. 17: popisná statistika hustoty v závislosti na pozici po poloměru kmene

Pozice ve kmeni	A (střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	1073.8	1027.6	1035.6	1042.6	1047.4	1056.1	1023.8
Počet hodnot	15	53	41	40	30	14	8
Medián	1072	1028	1038	1032.5	1043	1052	1047.5
Směrodatná odchylka	23.13	22.98	35.45	44.1	45.29	52.55	113.44
Minimum	1035	987	909	978	955	967	768
Maximum	1127	1089	1108	1163	1142	1148	1158
Rozdíl MIN-MAX	92	102	199	185	187	181	390
Variační koeficient	2.2	2.2	3.4	4.2	4.3	4.9	11.1



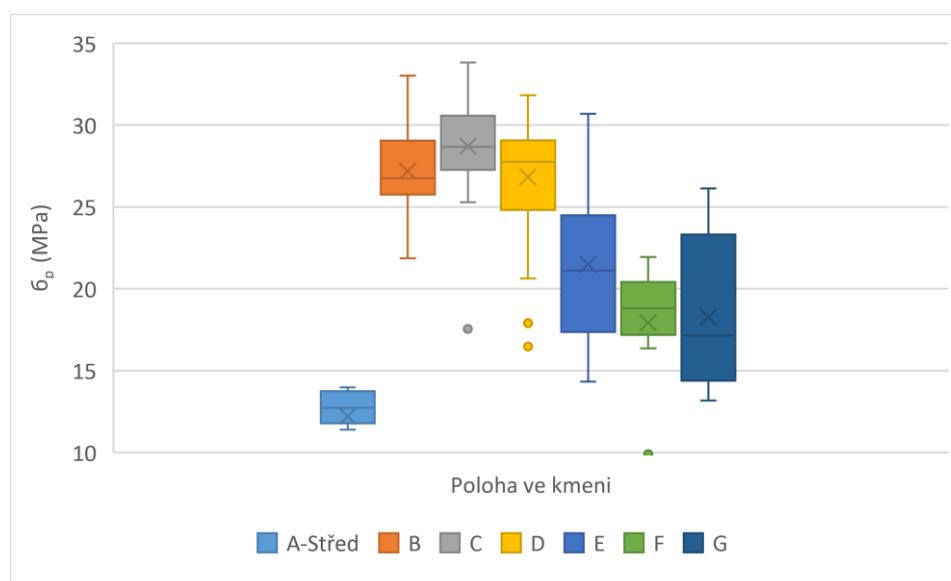
Obr. 22: hodnoty hustoty pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.2. Mez pevnosti

U středových vzorků „A“ byla naměřena nejmenší průměrná hodnota meze pevnosti (12,2 MPa), nejvyšší v pozici „C“ (28,7 MPa). S výjimkou středové části se směrem ke kambiu zvyšuje variabilita hodnot. V pozici B je variační koeficient roven 8,7 % a na pozici „G“ až 24,7 %. Na základě jednofaktorové anovy bylo zjištěno, že posuzovaný faktor (pozice ve kmeni) má statisticky významný vliv na mez pevnosti. Konkrétně vzorky A(střed) jsou statisticky odlišné od všech zbylých pozic. Pozice „B“ až „D“ a „E“ až „G“ jsou navzájem statisticky nevýznamné a jejich střední hodnoty se se považují za shodné. Ve zbylých případech se jedná o statisticky navzájem významně odlišné hodnoty.

Tab. 18: popisná statistika meze pevnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Pozice ve kmeni	A (střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	12.2	27.2	28.7	26.8	21.5	17.9	18.3
Počet hodnot	15	53	41	40	30	14	8
Medián	12.73	26.76	28.67	27.75	21.12	18.82	17.14
Směrodatná odchylka	1.89	2.36	2.78	3.49	4.41	3.59	4.51
Minimum	7.18	21.86	17.55	16.47	14.32	9.89	13.18
Maximum	13.97	33.01	33.83	31.82	30.69	21.94	26.12
Rozdíl MIN-MAX	6.79	11.15	16.28	15.35	16.37	12.05	12.94
Variační koeficient	15.5	8.7	9.7	13.03	20.5	20.04	24.7



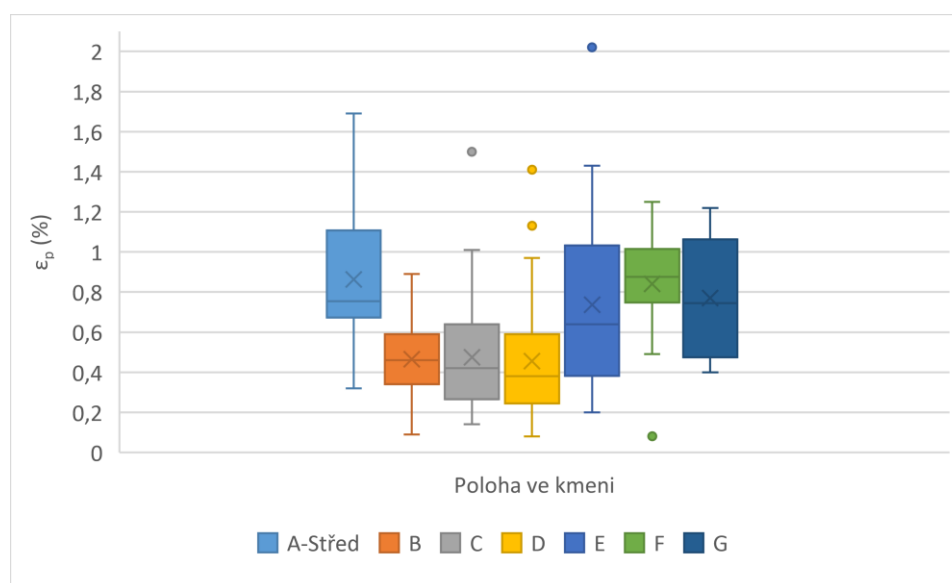
Obr. 29: hodnoty meze pevnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.3. Poměrná deformace na mezi pevnosti

K nejvyšší poměrné deformaci dochází v průměru ve středové části „A“ (0,863 %). Části „B“ až „D“ vykazují zřetelně menší průměrnou hodnotu poměrné deformace, než v případě vzorků z částí „E“ až „G“. Nejvyšší rozdíl mezi minimem a maximem je u pozice „E“ (1,82 %). Za nejpřesnější lze považovat hodnoty z pozice „B“ a „F“, směrodatná odchylka zde činí 0,18 % a 0,29 % a variační koeficient 38,9 % a 33,9 %. Jednofaktorová analýza prokázala, že poloha po poloměru má vliv na deformaci na mezi pevnosti. Pomocí Tukeyho testu bylo zjištěno, že části „B“ až „D“ se statisticky významně odlišují od částí „A“, „E“ a „F“. Lze tedy s vysokou pravděpodobností předpokládat, že poměrná deformace na mezi pevnosti je ovlivněna pozicí měřených vzorků po poloměru kmene.

Tab. 19: popisná statistika deformace na mezi pevnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Pozice ve kmeni	A (střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	0.863	0.464	0.474	0.456	0.737	0.84	0.77
Počet hodnot	14	53	41	38	28	14	6
Medián	0.76	0.46	0.42	0.38	0.64	0.88	0.75
Směrodatná odchylka	0.35	0.18	0.28	0.29	0.42	0.29	0.31
Minimum	0.32	0.09	0.14	0.08	0.2	0.08	0.4
Maximum	1.69	0.89	1.5	1.41	2.02	1.25	1.22
Rozdíl MIN-MAX	1.37	0.8	1.36	1.33	1.82	1.17	0.82
Variační koeficient	40.4	38.9	58.8	63.5	56.5	33.9	40.1



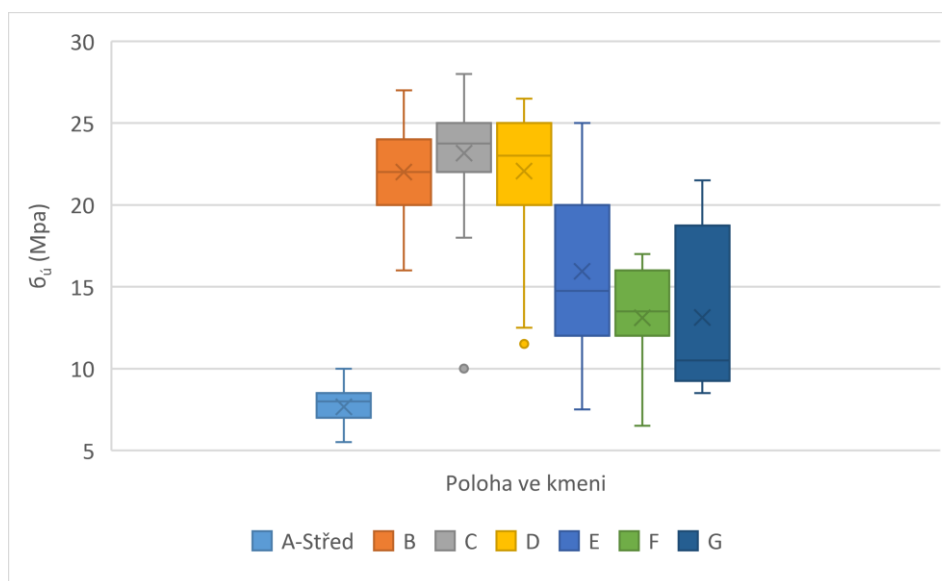
Obr. 23: hodnoty deformace na mezi pevnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.4. Mez úměrnosti

Aritmetický průměr meze úměrnosti je nejmenší ve středu kmene „A“ (7,7 MPa), následně roste až do části kmene „C“, kde je hodnota meze úměrnosti nejvyšší (23,2 MPa). Od části „C“ ke kambiu však průměrné hodnoty postupně klesají, v okrajové části kmene dosahuje průměrné hodnoty 13,1 MPa. Největší rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je v části „E“ (17,5MPa), naopak nejmenší ve středové části (5,5 MPa). Vzorok z části „E“ a „G“ mají nejvyšší variační koeficienty hodnot (33,5 % a 36,5 %). Pomocí statistické analýzy dat byla zamítnuta hypotéza o shodných středních hodnotách. Následný Tukeyho test prokázal, že většina středních hodnot je statisticky významně odlišná. S výjimkou částí „B“ až „D“, mezi kterými nejsou navzájem statisticky významné rozdíly. Rovněž u částí „E“ až „G“ nejsou statisticky významné rozdíly.

Tab. 20: popisná statistika meze úměrnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Poloměr	A(střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	7.7	22	23.2	22.3	15.7	13.1	13.1
Počet hodnot	15	50	38	41	30	14	8
Medián	8	22	23.75	23	14.5	13.5	10.5
Směrodatná odchylka	1.42	2.39	3.07	3.33	5.26	2.98	4.79
Minimum	4.5	16	10	11.5	7.5	6.5	8.5
Maximum	10	27	28	26.5	25	17	21.5
Rozdíl MIN-MAX	5.5	11	18	15	17.5	10.5	13
Variační koeficient	18.5	10.9	13.2	14.9	33.5	22.7	36.5



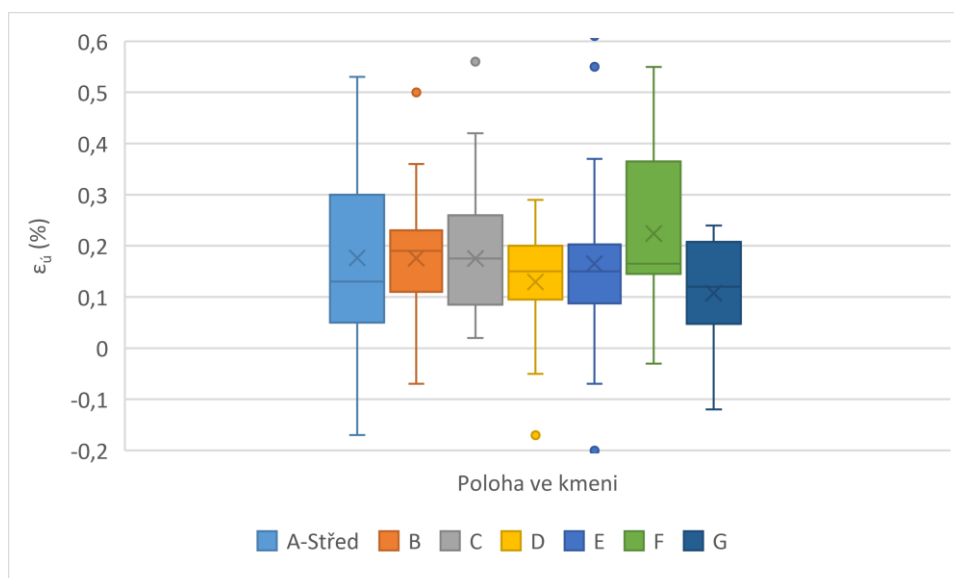
Obr. 24: hodnoty meze úměrnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.5. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (extenzometr)

V okrajové části „G“ byla zjištěna nejnižší průměrná hodnota poměrné deformace na mezi úměrnosti (0,108 %), nejnižší ve vedlejší části „F“ (0,224 %). Nejmenší směrodatnou odchylku (0,097) a variační koeficient (55,1 %) obsahují vzorky z části „B“. Nejvyšší variační koeficient je u hodnot vzorků z pozice „D“ (214,5 %). Středová část „A“ a část „F“ obsahuje největší rozmezí hodnot umístěných ve 25 % až 75 % kvantilu. Hypotéza o shodných středních hodnotách není zamítnuta, předpokládá se, že poloha ve kmeni nemá statisticky významný vliv na poměrnou deformaci na mezi úměrnosti.

Tab. 21: popisná statistika deformace na mezi úměrnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Poloměr	A(střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	0.177	0.176	0.175	0.13	0.163	0.224	0.108
Počet hodnot	15	50	38	41	30	14	8
Medián	0.13	0.19	0.175	0.155	0.14	0.165	0.12
Směrodatná odchylka	0.178	0.097	0.242	0.279	0.164	0.145	0.109
Minimum	-0.17	-0.07	-0.85	-1.01	-0.2	-0.03	-0.12
Maximum	0.53	0.5	0.98	0.98	0.61	0.55	0.24
Rozdíl MIN-MAX	0.7	0.57	1.83	1.99	0.81	0.58	0.36
Variační koeficient	100.6	55.1	138.3	214.5	100.3	64.5	101.6



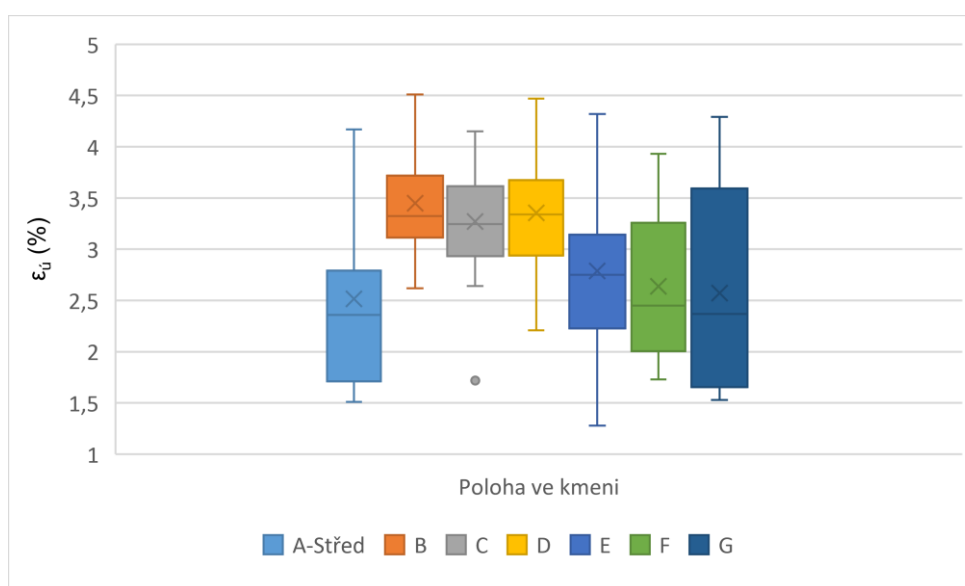
Obr. 25: hodnoty deformace na mezi úměrnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.6. Poměrná deformace na mezi úměrnosti (příčník)

Hodnoty poměrné deformace na mezi úměrnosti získané z příčnicku ukazují, že k nejvyšší deformaci došlo v průměru v části „B“ (3,449 %). Od části „D“ směrem ke kambiu se postupně hodnoty poměrné deformace snižují. Nejnižší průměrná hodnota je ve středu kmene (2,517 %). V části „G“ je nejvyšší směrodatná odchylka a variační koeficient díky nízkému počtu zkoumaných vzorků z této pozice. Nejnižší směrodatná odchylka a variační koeficient je v případě vzorků z části „C“. Variační koeficient se od části „C“ směrem ke kambiu zvyšuje. Na základě jednofaktorové anovy bylo zjištěno, že existuje statisticky významný rozdíl mezi některými ze zkoumaných částí. Tukeyho test ukázal, že středová části „A“ a „E“ se významně odlišují od částí „B“ až „D“. Část „F“ se dále statisticky významně odlišuje od částí „B“ a „D“. Lze tedy předpokládat, že pozice ve kmeni má vliv na poměrnou deformaci na mezi úměrnosti získanou pomocí příčnicku.

Tab. 22: popisná statistika deformace na mezi úměrnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Poloměr	A(střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	2.517	3.449	3.269	3.366	2.797	2.636	2.571
Počet hodnot	15	50	38	41	30	14	8
Medián	2.36	3.325	3.245	3.36	2.71	2.45	2.37
Směrodatná odchylka	0.838	0.498	0.457	0.523	0.734	0.671	0.962
Minimum	1.51	2.62	1.72	2.21	1.28	1.73	1.53
Maximum	4.17	5.1	4.15	4.47	4.32	3.93	4.29
Rozdíl MIN-MAX	2.66	2.48	2.43	2.26	3.04	2.2	2.76
Variační koeficient	33.3	14.4	13.9	15.5	26.2	25.4	37.4



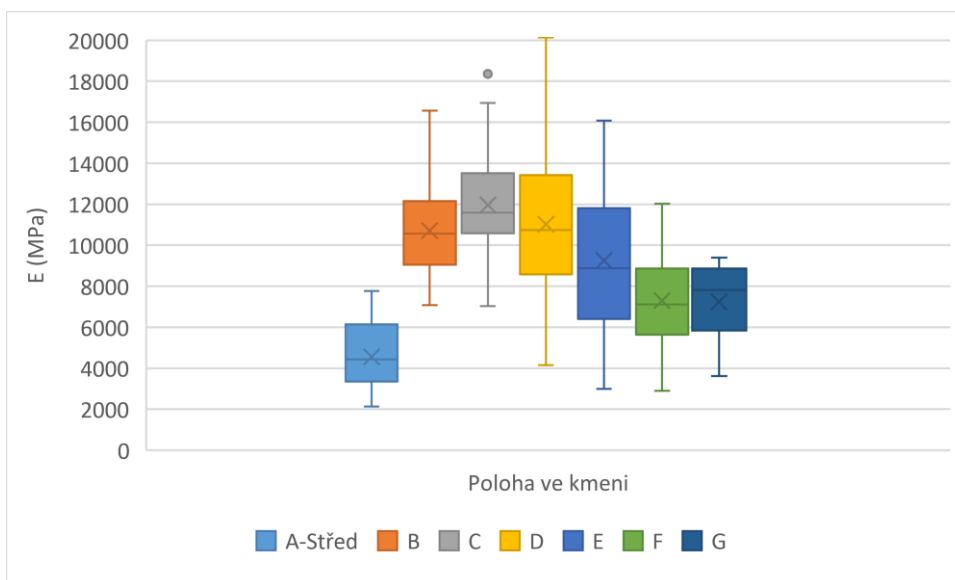
Obr. 26: hodnoty deformace na mezi úměrnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

### 5.4.7. Modul pružnosti

Nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti je ve středové části kmene „A“ (4562,1 MPa). Směrem k části „C“ průměrná hodnota roste, zde nabírá nejvyšších hodnot (11960,9 MPa) a následně směrem ke kambiu postupně klesá až na hodnotu 7242,3 MPa. Nejvyšší rozdíl mezi minimem a maximem je u části „D“ (15981,5 MPa), nejnižší ve středové části (5627,8 Mpa). Část „D“ se prokazuje nejvyšší směrodatnou odchylkou hodnot (3486,53 Mpa). Jednofaktorová anova zamítla hypotézu a shodných středních hodnotách. Středová část „A“ se statisticky významně liší od částí „B“ až „E“. Další rozdíl je mezi částí „C“ a částmi „E“ až „G“. Statisticky významné rozdíly jsou i mezi částmi „B“ a „E“ a mezi „D“ a „E“.

Tab. 23: popisná statistika modulu pružnosti v závislosti na pozici po poloměru kmene

Poloměr	A(střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	4562.1	10717.9	11960.9	11023.2	9257.9	7291.3	7242.3
Počet hodnot	15	53	41	40	30	14	8
Medián	4434.5	10571.4	11592.3	10736.4	8877.3	7112.6	7808.9
Směrodatná odchylka	1483.44	2212.62	2733.52	3486.53	3138.02	2299.61	1838.85
Minimum	2131.6	7085.8	7028.8	4150.1	2994.3	2899.6	3625
Maximum	7759.4	16568.4	18358.3	20131.6	16083.4	12031.5	9401.8
Rozdíl MIN-MAX	5627.8	9482.6	11329.5	15981.5	13089.1	9131.9	5776.8
Variační koeficient	32.5	20.6	22.9	31.6	33.9	31.5	25.4



Obr. 27: hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

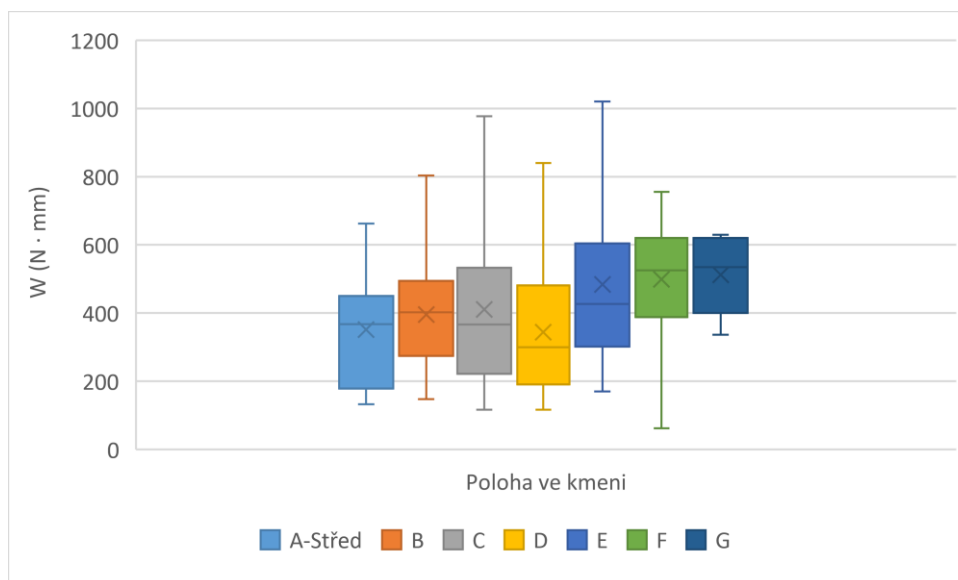


### 5.4.8. Práce

Okrajová část „G“ má nejvyšší aritmetický průměr hodnoty práce díky nízkému počtu hodnot, hodnoty z této části lze považovat za zkreslené. Průměrné hodnoty se od části „B“ (395,6 N · mm) postupně zvyšují až do části „E“ (893,9 N · mm), v části „F“ je ovšem hodnota znatelně nižší (498,8 N · mm). Největší variační koeficient hodnot je ve středové části „A“ (162,4 %). Na základě zpracování statistické analýzy byla zamítnuta hypotéza o shodných středních hodnotách. Předpokládá se, že poloha v poloměru kmene má významný vliv na hodnotu práce.

Tab. 24: popisná statistika práce v závislosti na pozici po poloměru kmene

Poloměr	A(střed)	B	C	D	E	F	G
Aritmetický průměr	351.6	395.6	410.5	343.8	486.8	498.8	512.1
Počet hodnot	14	53	41	38	27	14	6
Medián	367.3	402.4	366	299.3	430.6	524.7	534.4
Směrodatná odchylka	156.01	143.8	211.78	185.37	209.61	176.71	104.28
Minimum	132.7	147.9	116.2	116.3	238.9	61.9	336.2
Maximum	662.2	803	976.7	840.4	1019.9	755.3	629.6
Rozdíl MIN-MAX	529.5	655.1	860.5	724.1	780	693.4	293.4
Variační koeficient	44.4	36.3	51.6	53.9	43.1	35.4	20.4



Obr. 28: hodnoty práce pro jednotlivé pozice v poloměru kmene

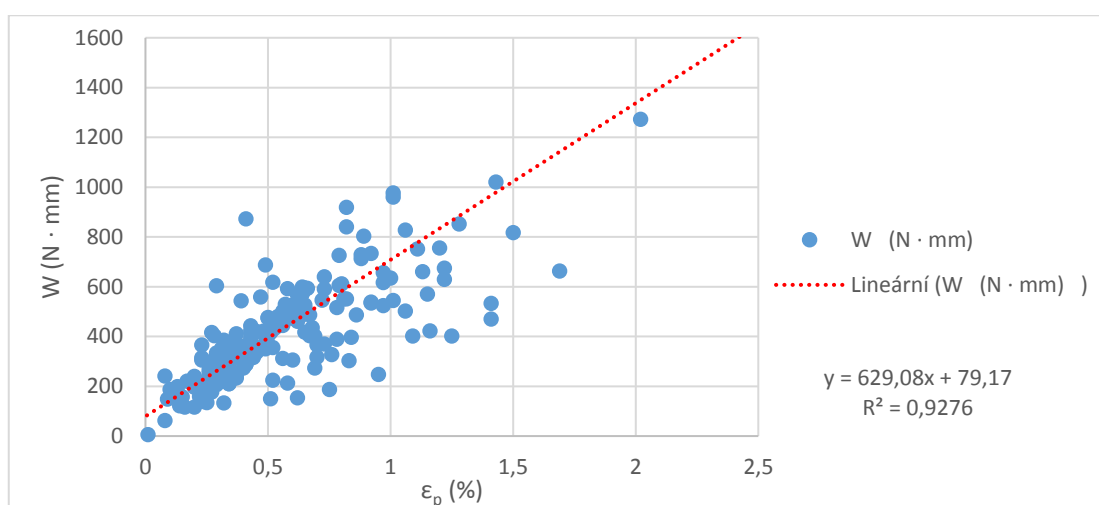
## 5.5. Korelace vybraných vlastností

Byla provedena korelace všech zkoumaných vlastností pro zjištění míry úměrnosti jednotlivých zkoumaných vlastností. Nejsilnější přímá úměra byla zjištěna u mezi deformaci na mezi pevnosti  $\epsilon_p$  a práci  $W$  (0,9666). Další přímá úměra je u meze pevnosti  $\sigma_p$  a modulem pružnosti  $E$  (0,7319) a mezi deformací na mezi úměrnosti z příčnicku  $\epsilon_{\dot{u}}$  (př.) a mezi úměrnosti  $\sigma_{\dot{u}}$  (0,5321). Nejsilnější nepřímá úměra je mezi deformací na mezi pevnosti  $\epsilon_p$  a modulem pružnosti  $E$  (-0,4065). Nepřímá úměra platí i mezi modulem pružnosti a hustotou a mezi pevností a hustotou.

Tab. 25: korelační tabulka všech zkoumaných vlastností

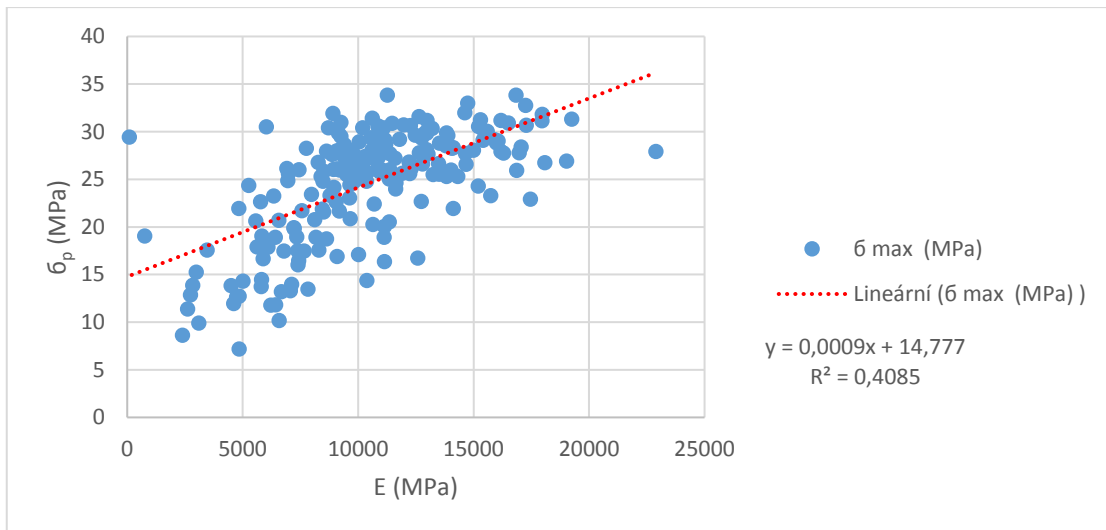
	$\rho$	$\sigma_p$	$E$	$\epsilon_p$	$W$	$\sigma_{\dot{u}}$	$\epsilon_{\dot{u}} (ext.)$	$\epsilon_{\dot{u}} (př.)$
$\rho$	1							
$\sigma_p$	-0.2369	1						
$E$	-0.1469	0.7319	1					
$\epsilon_p$	0.2426	-0.3296	-0.4065	1				
$W$	0.2172	-0.2108	-0.3304	0.9666	1			
$\sigma_{\dot{u}}$	0.0509	0.1348	0.1421	-0.1262	-0.1048	1		
$\epsilon_{\dot{u}} (ext.)$	-0.0241	0.0133	0.0065	-0.0343	-0.0149	-0.0619	1	
$\epsilon_{\dot{u}} (př.)$	0.0277	-0.0352	-0.0167	-0.0392	-0.0317	0.5321	0.1380	1

Lineární spojnice trendu značí přímou úměru mezi prací  $W$  a poměrnou deformací na mezi pevnosti  $\epsilon_p$ . Platí zde vysoká hodnota spolehlivosti, koeficient determinace  $R^2$ , který značí velikost lineárního vztahu mezi porovnávanými veličinami, je roven 0,9276. Výchozí data jsou tedy na grafu umístěné velmi blízko spojnice trendu, tu lze označit za velmi spolehlivou.



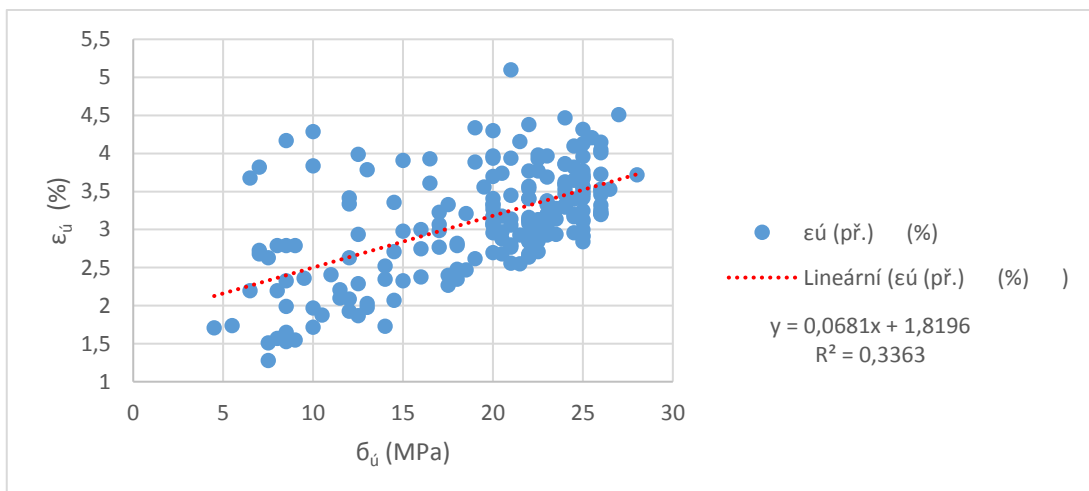
Obr. 29: graf závislosti práce na poměrné deformaci na mezi pevnosti

Korelační koeficient je v tomto případě 0,7319, závislost je přímá a poměrně silná. Koeficient determinace ( $R^2 = 0,4085$ ) značí, 40,85 % ze všech zkoumaných dat spolehlivě odpovídá spojnici trendu.



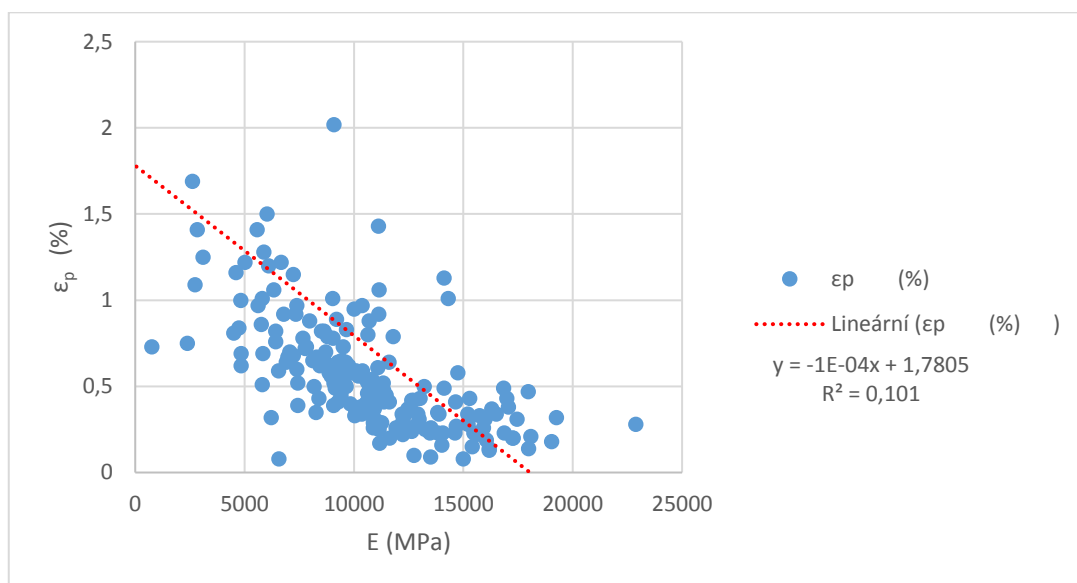
Obr. 30: graf závislosti meze pevnosti na modulu pružnosti

Přímá úměra platí i mezi poměrnou deformací na mezi úměrnosti  $\epsilon_{\bar{u}}$  a napětím na mezi úměrnosti  $\bar{\sigma}_u$ . S rostoucí hodnotou modulu pružnosti roste i mez pevnosti. Korelační koeficient činí 0,5321 a hodnota spolehlivosti měřených bodů ke spojnici trendu je  $R^2 = 0,3363$ . Spojnice trendu je tedy přizpůsobená výchozím datům z jedné třetiny.



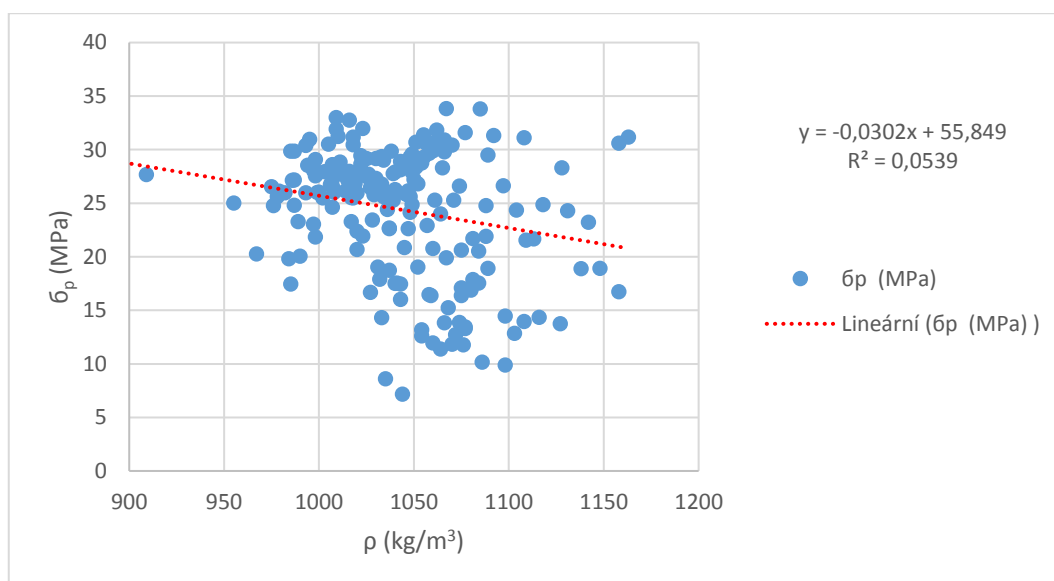
Obr. 31: graf závislosti poměrné deformace na mezi úměrnosti z příčnicku a meze úměrnosti

Graf závislosti poměrné deformace na mezi pevnosti  $\epsilon_p$  a modulu pružnosti E značí nepřímou úměrnost. Korelační koeficient je -0,4065. S rostoucím modulem pružnosti materiálu klesá jeho deformace při namáhání. Koeficient determinace je roven 0,101, většina měřených dat neleží v blízkosti spojnice trendu, i když její směr určují.



Obr. 39: graf závislosti poměrné deformace na mezi pevnosti a modulu pružnosti

V případě porovnání meze pevnosti na hustotě dřeva vzniká taktéž nepřímá úměra, korelační koeficient však není příliš vysoký (-0,2369) a koeficient determinace poukazuje na to, že pouhých 5,39 % z celkových výsledných hodnot ovlivňuje průběh spojnice trendu.



Obr. 40: graf závislosti meze pevnosti na hustotě dřeva

## 6. Diskuse

### 6.1. Hustota dřeva

Hustotu javoru mléče v čerstvém stavu uvádí Němec (1964) jako  $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$ , další zdroje uvádí hustotu  $\rho = 910 \text{ kg/m}^3$  (www.drevostavitel.cz). Vyšší hustota dřeva v našem případě je s největší pravděpodobností zapříčiněna vyšším obsahem vody ve dřevě. Mezi přípravou vzorků a samotným měřením byly vzorky vloženy do nádob s vodou, aby neztratily svou vlhkost. Je tedy možné, že se vlhkost dřeva a tedy i jeho hustota ještě zvýšila. Průměrná hustota u jednotlivých výřezů byla:  $\rho = 1024 \text{ kg/m}^3$  (výřez č. 1),  $\rho = 1072,3 \text{ kg/m}^3$  (výřez č. 2),  $\rho = 1005,9 \text{ kg/m}^3$  (výřez č. 4) a  $\rho = 1048 \text{ kg/m}^3$  (výřez č. 5). Variační koeficient naměřených hodnot byl v rozmezí 2,2 % do 4,4 %. Jednotlivé velikosti průměrných hodnot hustoty tedy nejsou seřazeny postupně podle výšky, ve které se jednotlivý výřez nacházel. Požgaj (1997) uvádí, že s rostoucí výškou kmene klesá hustota dřeva. Také Perelygin (1960) uvádí, že nejlepší fyzikální a mechanické vlastnosti má dřevo ve spodní části kmene a směrem nahoru se tyto vlastnosti postupně zhoršují. U listnatých dřev s kruhovitě pórovitou stavbou však nelze tento fakt jednoznačně prokázat, jelikož v tomto případě záleží na jednotlivém druhu dřeviny (Lexa et al. 1952). Statistická analýza prokázala vliv čísla výřezu na hustotu dřeva, nejedná se však o postupnou změnu hustoty po výšce. Lze tedy konstatovat, že toto měření neprokázalo zásadní vliv polohy po výšce kmene na hustotu dřeva.

V případě porovnávání hustoty v závislosti na orientaci vůči světovým stranám se dospělo k názoru, že tento faktor nemá na hustotu dřeva zásadní vliv. Nejvyšší průměrná hustota byla změřena na části z jihu ( $\rho = 1050,8 \text{ kg/m}^3$ ), naopak nejnižší na západní části kmene ( $\rho = 1029,3 \text{ kg/m}^3$ ). Pro srovnání byla přidána hodnota průměrné hustoty ze středové části kmene ( $\rho = 1073,8 \text{ kg/m}^3$ ). Pomocí analýzy rozptylu se prokázala statisticky významná odlišnost pouze mezi středovou a západní částí. Mezi jednotlivými krajními částmi kmene se však neprokázal významný rozdíl. Nelze tedy předpokládat, že orientace vůči světovým stranám nemá zásadní vliv na hustotu dřeva.

Porovnáním hustoty dřeva po poloměru kmene bylo zjištěno, že nejvyšší průměrná hustota dřeva se nachází ve středové části „A“ ( $\rho = 1073,8 \text{ kg/m}^3$ ). To odpovídá tvrzení Kollmanna (1941), který uvádí u listnatých dřevin středovou část jako tu s nejvyšší hustotou dřeva. V části „B“ je hustota  $\rho = 1027,6 \text{ kg/m}^3$ , která směrem ke kambiu postupně roste a v části „F“ je hustota  $\rho = 1056,1 \text{ kg/m}^3$ . V okrajové části „G“ je však průměrná hustota nejnižší a to  $\rho = 1023,8 \text{ kg/m}^3$ .

Variační koeficient se směrem od středu ke kambiu postupně zvyšuje, obvodové části kmene tedy vykazují větší variabilitu hustoty než středové části. Kollmann (1941) dále uvádí u listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou pokles hustoty dřeva směrem ke kambiu v důsledku snižujícího se podílu letního dřeva. V případě roztroušeně pórovitých dřevin, jako je javor, však lze tento fakt zamítnout.

Na jiný průběh velikostí hustot na jednotlivých částech po poloměru u roztroušeně pórovitého dřeva na rozdíl od kruhovitě pórovitého dřeva může mít vliv i obsah extraktivních složek v jádře, které se u některých kruhovitě pórovitých dřev vyskytuje, zatímco dřevo javoru takové látky neobsahuje. U dřeva javoru se však může vyskytovat nepravé jádro.

## **6.2. Mez pevnosti**

Závislost meze pevnosti na pozici po výšce kmene nebyla prokázána, jelikož stejně, jako u hustoty nejsou průměrné hodnoty této zkoumané veličiny seřazeny podle čísel výřezů. Tudíž i zde se lze odkázat na tvrzení Kollmanna (1941), který uvádí, že u roztroušeně pórovitých dřevin nelze z přesností určit pravidelnost mezi mechanickými vlastnostmi dřeva po výšce kmene.

Ke stejnému závěru se došlo i v případě porovnávání meze pevnosti po světových stranách. Nejnižší průměrná hodnota byla u části ze severu (24,7 MPa) a nejvyšší na východní straně (25,9 MPa). Jednofaktorová anova prokázala, že orientace na jednotlivou světovou stranu nemá statisticky významný vliv na mez pevnosti.

Měřením meze pevnosti po poloměru kmene bylo zjištěno, že nejnižší mez pevnosti je ve střední části kmene „A“ ( $\sigma_p = 12,2 \text{ MPa}$ ), následně směrem ke kambiu roste, v části „C“ je hodnota meze pevnosti nejvyšší (28,7 MPa), dále však už hodnota meze pevnosti směrem ke kambiu klesá. Platí zde nepřímá úměra meze pevnosti a hustoty, s rostoucí hustotou dřeva klesá mez pevnosti. Což je přesný opak toho, co uvádí literární zdroje. Hodnoty pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny se u našich dřevin pohybuje v rozmezí od 30-70 MPa. Mez pevnosti u dřeva javoru při vlhkosti 12 % je asi 45 MPa. S rostoucí vlhkostí však mez pevnosti klesá. Vlastnosti dřeva se zhoršují se zvyšující se vlhkostí pouze do meze hygroscopicity, voda volná nemá na mechanické vlastnosti takový vliv, jako voda vázaná. Mez pevnosti pevnosti u čerstvého javoru v rozmezí 22,3 MPa až 27,7 MPa (Bergman, 2010). Technická univerzita ve Zvoleni uvádí mez pevnosti u čerstvého javoru jako 29 MPa ([www.tuzvo.sk](http://www.tuzvo.sk)). Což odpovídá námi zjištěným hodnotám.

Horáček (2008) uvádí mez pevnosti při vlhkosti dřeva na mezi hygroskopicity 3,5krát nižší než v případě suchého dřeva. Při tlaku dochází i k namáhání vazeb, které zeslabeny navázáním molekul vody, tedy u vodíkových vazeb mezi lignino-sacharidovým komplexem.

### **6.3. Poměrná deformace na mezi pevnosti**

Poměrná deformace na mezi pevnosti byla zjišťována pomocí extenzometru. Z grafů znázorňujících hodnoty této měřené veličiny (obr. 15, obr. 23 a obr. 31) lze usoudit, že průměrné hodnoty poměrné deformace na mezi pevnosti mají u všech variant měření přesně opačný průběh. Zjednodušeně řečeno: v částech, kde je vysoká mez pevnosti probíhá malá poměrná deformace na mezi pevnosti. Jelikož však platí vztah pro výpočet napětí jako součin modulu pružnosti a poměrné deformace, je zřejmé, že se jedná o nepřesný způsob zjišťování této veličiny. Hodnoty poměrných deformací měřených pomocí příčnicku jsou až 20krát vyšší, než pomocí extenzometru a mají daleko nižší variační koeficient. Tímto způsobem se však zjišťovala pouze deformace ne mezi úměrnosti.

### **6.4. Mez úměrnosti**

Velikost meze měrnosti byla určována přímo v programu testXpert. Určením bodu, kde končí lineární část na diagramu napětí-deformace vyšla na ose „y“ velikost meze úměrnosti a na ose „x“ velikost deformace na mezi úměrnosti.

U všech variant zkoumání (po výšce, světové straně a poloměru) tak vyšly v podstatě stejné výsledky, jako v případě meze pevnosti. Hodnoty meze úměrnosti jsou v tomto případě zhruba o 20 % nižší než hodnoty meze pevnosti. Požgaj (1997) uvádí mez úměrnosti zhruba dvakrát nižší než mez pevnosti.

### **6.5. Poměrná deformace na mezi úměrnosti**

Byla zjišťována stejným způsobem, jako mez úměrnosti. V programu testXpert byly výstupními hodnotami poměrné deformace na mezi úměrnosti získané dvěma rozdílnými způsoby, pomocí extenzometru a příčnicku. Předpokládalo se, že hodnoty získané pomocí příčnicku budou zhruba 20krát vyšší. V případě extenzometru byla nejvyšší průměrná hodnota naměřena v části „F“, tedy blízko kambiu. Nejnižší poměrnou deformaci na mezi pevnosti vykazovala okrajová část „G“. Variační koeficient těchto hodnot se pohyboval v rozmezí od 55,1 % až do 214,5 %.

Průměrné hodnoty z příčnicku byly nejnižší ve středové části „A“, další tři části směrem ke kambiu vykazovaly značně zvýšené hodnoty a od části „D“ do části „G“ se

postupně snižovaly. Při porovnání krabicových grafů u meze úměrnosti (obr. 32) a deformace na mezi úměrnosti (obr. 33) je zřejmé, že průběh hodnot po poloměru kmene je velmi podobný.

Daleko přesněji tak odpovídá Hookovu zákonu, který zní: „*deformace je přímo úměrná napětí materiálu*“. Dá se tedy předpokládat, že deformace měřené pomocí příčnicku jsou přesnější než pomocí extenzometru.

### **6.6. Modul pružnosti**

Naměřené hodnoty modulu pružnosti poukázaly na fakt, že nejnižší průměrná hodnota ( $E = 10015,5$  MPa) byla naměřena na spodní části kmene (výřez č. 1), směrem nahoru hodnota modulu pružnosti roste a nejvyšší průměrná hodnota ( $E = 12113,9$  MPa) byla na nejvyšší části kmene (výřez č. 5). Z výsledků lze tedy usoudit, že i v případě javoru, jakožto roztroušeně pórovité dřeviny může mít poloha po výšce kmene vliv na modul pružnosti dřeva.

V případě orientace vůči světovým stranám nebylo statisticky dokázáno, že má tento faktor statisticky významný vliv na modul pružnosti.

Krabicový graf modulu pružnosti po poloměru kmene (obr. 35) a meze pevnosti (obr. 30) naznačuje podobný vliv pozice měřených vzorku po poloměru kmene na modul pružnosti, jako v případě meze pevnosti. Nejnižší průměrnou hodnotu vykazuje středová část „A“ (4562,1 MPa), hodnoty poté rostou do části „C“, kde dosahují maxima (11960,9 MPa) a poté směrem ke kambiu klesají. Tento průběh odpovídá tomu, které uvádí Panshin a de Zeeuw (1980), podle nich jsou nejlepší mechanické vlastnosti dřeva zhruba ve středu poloměru kmene. Modul pružnosti u domácích dřevin se pohybuje v rozmezí od 7000 do 15000 MPa (Požgaj et al., 1997). Bergman (2010) uvádí toto rozmezí jako 7600 až 11300 MPa. Velikost modulů pružnosti naměřených v tomto případě odpovídá tomuto rozmezí.

### **6.7. Práce**

Práce udává součin síly působící na těleso a dráhy, kterou těleso urazí, nebo o kterou je těleso při tlaku, nebo tahu zkráceno, či prodlouženo. Jednotkou energie a práce je joule (J), též se udává jako  $N \cdot m$  (v našem případě  $N \cdot mm$ ).

Nejmenší hodnota práce po výšce kmene byla naměřena u výřezu č. 1 (374,2  $N \cdot mm$ ), u výřezů č. 2 a č. 4 byly průměrné hodnoty vyšší (430,1  $N \cdot mm$  a 432,2  $N \cdot mm$ ) a u výřezu č. 5 se hodnota snížila na 419,8  $N \cdot mm$ . Šetřením podle jednofaktorové anovy se neprokázala významná závislost pozice po výšce kmene a práce.



Ke stejnému závěru se dospělo i v případě zkoumání vlivu orientace světových stran, i v tomto případě bylo statisticky dokázáno, že jednotlivé světové strany nemají na hodnotu práce významný vliv. Rozdíl hodnot mezi stranou na jihu (379,6 N · mm) a severní stranou (438,1 N · mm) je 58,5 N · mm, z tohoto pohledu se tedy nedá vyloučit alespoň mírný vliv světové strany, i když se podle šetření nejednalo o statisticky významný rozdíl středních hodnot.

Zkoumáním této veličiny po poloměru bylo zjištěno, že průměrné hodnoty od středu směrem ke kambiu postupně rostou, výjimkou je část „D“, jenž vykazuje nejmenší průměrnou hodnotu

### **6.8. Korelace naměřených hodnot**

Vzájemným korelováním jednotlivých měřených hodnot bylo zjištěno následující: největší přímá závislost platí mezi prací  $W$  a deformací na mezi pevnosti  $\epsilon_p$ . Korelační koeficient zde činí 0,9666 a koeficient determinace 0,9276, což znamená, že 92,76 % celého rozptylu hodnot práce  $W$  lze vysvětlit závislostí na poměrné deformaci  $\epsilon_p$ . Závislost tak přímo vypovídá vztahu pro výpočet práce, jelikož se hodnota práce vypočítá jako součin působící síly a dráhou, které těleso urazí, nebo o kterou je těleso zdeformováno.

Další přímá úměra platí u meze pevnosti a modulu pružnosti, korelační koeficient je zde 0,7319. Koeficient determinace  $R^2 = 0,4085$ , pouze u 40,85 % všech hodnot lze říci, že přímo odpovídají směrnici trendu.

Další přímá úměra platí u meze úměrnosti a její poměrnou deformací (z příčnicku). Jelikož se však jednalo o zjišťování obou těchto hodnot stejným způsobem (odhadem konce lineárního průběhu v diagramu napětí-deformace pomocí programu testXpert), dá se tato závislost logicky očekávat.

Nepřímá úměra platí mezi poměrnou deformací na mezi pevnosti a modulem pružnosti. S rostoucím modulem pružnosti klesá deformace s korelačním koeficientem 0,5321. Zajímavostí je nepřímá úměrnost mezi modulem pružnosti a hustotou a mezi pevností a hustotou, v tomto případě by měla platit přímá úměra mezi těmito veličinami. Korelační koeficienty jsou však příliš nízké na to, aby se s jistotou prokázala nepřímá úměrnost, pouze malá část hodnot navíc určuje směrnici trendu (nízký koeficient determinace).

## 7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení hustoty, meze pevnosti a modulu pružnosti u dřeva javoru mléče (*Acer Platanoides L.*) v čerstvém stavu, jenž pochází z urbanizovaného prostředí. Dalšími zkoumanými vlastnostmi byly mez úměrnosti, deformace na mezi pevnosti a úměrnosti a vynaložená práce při tlaku podél vláken. U všech těchto vlastností byla zkoumána jejich variabilita v závislosti na dřívějším umístění měřených vzorků po výšce, poloměru a vůči světovým stranám. Dřevo javoru bylo použito z důvodu nízkého počtu informací právě o této dřevině. Z odborné literatury se můžeme dočíst hustotu, modul pružnosti a mez pevnosti. Problémem však je porovnat tyto hodnoty co se týče distribuce po poloměru a výšce kmene

V případě zkoumání hustoty javoru po výšce kmene se neprokázal vliv polohy po výšce kmene na hustotu roztroušeně pórovitého dřeva. U porovnání modulu pružnosti po výšce bylo zjištěno, že se modul pružnosti po výšce kmene zvyšuje. V případě zbylých vlastností však nebyl jasně prokazatelný vliv tohoto faktoru. Porovnáváním vzorků z části kmene orientované na jednotlivou světovou stranu se již zabývala celá řada prací, nikde se však nepodařilo určit, zda má tento faktor významný vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Ani v tomto případě nedošlo k zaznamenání výrazného rozdílu mezi jednotlivými světovými stranami.

Nejzajímavější částí bylo porovnávání vlastností po poloměru kmene, nejvyšší průměrná hustota byla naměřena ve střední části kmene „A“ ( $1073,8 \text{ kg/m}^3$ ), nejnižší ve vedlejší části „B“ ( $1027,6 \text{ kg/m}^3$ ), následně hustota směrem ke kambiu rostla, na okrajové části „G“ však opět poklesla na  $1023,8 \text{ kg/m}^3$ . Nejnižší mez pevnosti byla změřena ve středové části „A“ (12,2 MPa), směrem do části „C“ postupně rostla a od této části směrem ke kambiu se začala opět snižovat. Stejný průběh výsledných hodnot v jednotlivých částech po poloměru byl naměřen i v případě modulu pružnosti. Pomocí korelace byla prokázána závislost mezi modulem pružnosti a mezí úměrnosti, korelační koeficient zde činil 0,7319 a koeficient determinace 0,9276. To znamená, že 92,76 % ze všech hodnot odpovídá této korelaci a splňuje závislost těchto porovnávaných veličin.

Výsledky této práce proto mohou posloužit při porovnávání mechanických vlastností roztroušeně pórovitých dřevin, hlavně javoru. Mají poukázat na fakt, že tento druh dřevin může být velmi odlišný od jiných zkoumaných dřevin. Z praktického hlediska je znalost rozdílnosti jednotlivých mechanických vlastností velmi užitečná, hlavně co se týče poloměru kmene. Může se tak předejít tomu, aby v dřevařském průmyslu nedocházelo k výrobě namáhaných konstrukčních materiálů z nevhodné části kmene. Znalost variability mechanických vlastností v jednotlivých částech kmene je důležitá může ušetřit spoustu práce a starostí.

## 8. Summary

In this thesis were examined mechanical properties of freshly felled timber. Specifically, the wood of Norway maple (*Acer platanoides L.*). Density, strength, deformation, modulus of elasticity and work has been examined for different heights in the trunk of tree, for different location in radius of trunk and also in location of world sides. The problem arose when comparing results with literary sources. In literary sources there is too little informations about mechanical properties and their distribution along the radius and height of maple trunk, especially in freshly. In individual world sides hasn't been demonstrated any difference between mechanical properties. Only density in south side was bit bigger, than other sides. It hasn't been possible to determine whether the location at different height of trunk affect on the mechanical propertis. There were some differences, but not gradually along the trunk height. At a wood of circulary porous deciduos trees the mechanical properties worsening with increasing height. But at a scattered porous wood there is not same rules here. Comparising the mechanical propertis in the width of the trunk has brought interesting insights. At different locations in the trunk width, the mechanical propeties change, but not the same as for circular porous trees such as oak tree. The result of this thesis is the determination of the mechanical properties in the individual parts of the strain and their mutual comparison.

## 9. Seznam literatury

- BERGMAN R., CARL C., CAI Z. 2010. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Madison, Wis. (U. S.): Forest Products Laboratory (U. S.), 508 s.
- BODIG, J., JAYNE, B.A., 1993. Mechanics of Wood and Wood Composites, Malabar: Krieger Publish.Comp., 712 s.
- DUGAS, R.A., 1955. A History of mechanics. Translated into English by J.R.Maddox, Neuchatel, Editions du Griffon, New York Central Book Co.,pp 199, 203-207
- HART, I.B., 1925. The Mechanical investigations of Leonardo da vinci, London, Chapman and Hall Ltd., pp.225, 275-276
- HORÁČEK, P., 2008. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. ES MZLU v Brně, 124 s.
- JAYNE, B.A., 1972. Orthotropic elasticity in: B.A.Jayne, ed. Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials. Syracuse Univ. Press, Syracuse, NY, pp. 196
- KELLOGG, R.M., WANGAARD, F.F., 1969. Variation in the cell wall density of wood. Wood Fiber 1(3): pp. 180-204
- KENNEDY, E.I., 1965. Strength and related properties of wood grown in Canada. Dept. For. Pub. No., Ottawa, Canada, 369 s.
- KOLLMANN, F., 1941. Die Esche und ihr Holz. Berlin: Verlag von Julius Springer, 147 s.
- KUNC, A., ZIMA, J., WANNER, J., 1961. Mechanika II. Pružnost a pevnost. 4. vyd. Praha: SNTL, 321 s.
- LEXA, J. a kol., 1952. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva, I. Svazok technologie dreva. Bratislava. 436 s
- MARKWARD, L.J., WILSON T.R.C., 1935. Strength and related properties of wood grown in the United States. U.S.Dept. Agric. Tech. Bull. 479 s.
- MATOVIČ, A., 1993. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálu na bázi dřeva. ES VŠZ v Brně, 212 s.
- MÜLLER-STOLL W.R., 1948. Photometrische Holzstrukturuntersuchungen. Part II. Über die Beziehungen der Lichtdurchlässigkeit von Holzschnitten zu Rochwichte und Wichtekontrast. Forstwiss. Centr. 68: pp. 21-63
- NĚMEC J., 1964. Technická příručka lesnická, SZN Praha, s. 855
- PANSHIN, A. J., ZEEUW DE, C., 1980. Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. 4. vyd. New York: McGraw-Hill, 722 s.
- POKORNÝ J., 2003. *Stromy*, Aventum nakladatelství s.r.o, Praha, 224 s.
- POŽGAJ, A.et al., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. Príroda Bratislava, 488 s.

SIMPSON W., TENWOLDE A., 1999. Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General Technical Report 113. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, k. 3, s. 1-25

STAMM, A.J. 1964. Wood and cellulose science. The Roland Press Co., New York, 549 s.

ŠLEZINGEROVÁ J, GANDELOVÁ, L., 2005. Stavba dřeva. ES MZLU v Brně, 187 s.

ÚRADNÍČEK, L., CHMELAR, J., 1995, Dendrologie lesnická 1.-2., MZLU v Brně, 450 s.

WAGENFÜHR R., 2002. Dřevo: obrazový lexikon, Grada Publishing a.s., Praha, 348 s.

ČSN 49 0110 - Dřevo. Medza pevnosti v tlaku v směru vláken, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1980

ČSN 49 0111 – Zkoušky vlastností dřeva. Metody zjišťování modulu pružnosti tlaku podél vláken, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1980

Hustota dřeva, [www.drevostavitel.cz](http://www.drevostavitel.cz) [online] citováno 4. 2. 2017. Dostupné na World Wide Web:

< <https://www.drevostavitel.cz/nastroj/hmotnost-dreva> >.

Javor, <https://en.wikipedia.org> [online] citováno 14. 12. 2016. Dostupné na World Wide Web:

< <https://en.wikipedia.org/wiki/Maple>>.

Javor, <https://cz.pinterest.com/>[online] citováno 20. 1. 2017. Dostupné na World Wide Web:< <https://cz.pinterest.com/pin/562035228474139407/>>.

Mez pevnosti, [www.tuzvo.sk](http://www.tuzvo.sk) [online] citováno 20. 3. 2017. Dostupné na World Wide Web: <[https://www.tuzvo.sk/sk/organizacna\\_struktura/lesnicka\\_fakulta/organizacne-clenenie/katedry/katedra-lesnej-tazby-logistiky-melioracii/servis\\_studentom/hlavna-dreviny/javor-mliecny.html](https://www.tuzvo.sk/sk/organizacna_struktura/lesnicka_fakulta/organizacne-clenenie/katedry/katedra-lesnej-tazby-logistiky-melioracii/servis_studentom/hlavna-dreviny/javor-mliecny.html)>.

Makroskopická stavba, <http://ldf.mendelu.cz> [online] citováno 28. 1. 2017. Dostupné na World Wide Web:

<[http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=jv](http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=jv)>.

Mikroskopická stavba, <http://ldf.mendelu.cz> [online] citováno 28. 1. 2017. Dostupné na World Wide Web:

<[http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=jv](http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=jv)>.

## 10. Přílohy

Tab. 26: statistická analýza hustoty po světových stranách

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Hustota (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	176916977	1	176916977	93487,32	0,000000
Světová strana	31270	4	7817	4,13	0,003095
Chyba	370914	196	1892		

Tab. 27: Tukeyho test statistického porovnání hustoty po světových stranách

HSD při nestejných N; proměnná Hustota (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1892,4, sv = 196,00						
Č. buňky	Světová strana	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		1035,5	1050,8	1033,8	1029,3	1073,8
1	Sever		0,430721	0,999828	0,958811	0,111730
2	Jih	0,430721		0,446745	0,097515	0,595239
3	Východ	0,999828	0,446745		0,991875	0,086376
4	Západ	0,958811	0,097515	0,991875		0,040577
5	Střed	0,111730	0,595239	0,086376	0,040577	

Tab. 28: statistická analýza hustoty po výšce kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Hustota (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	173067019	1	173067019	133835,3	0,00
Číslo kmene	140763	3	46921	36,3	0,00
Chyba	235350	182	1293		

Tab. 29: Tukeyho test statistického porovnání hustoty po výšce kmene

HSD při nestejných N; proměnná Hustota (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1293,1, sv = 182,00					
Č. buňky	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
		1024,0	1072,3	1006,0	1048,0
1	1		0,000008	0,075490	0,107233
2	2	0,000008		0,000008	0,099452
3	4	0,075490	0,000008		0,000451
4	5	0,107233	0,099452	0,000451	

Tab. 30: Statistická analýza hustoty po poloměru kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Hustota (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	146396413	1	146396413	77072,79	0,000000
Poloha ve kmene	33689	6	5615	2,96	0,008766
Chyba	368495	194	1899		

Tab. 31: Tukeyho test statistického porovnání hustoty po poloměru kmene

HSD při nestejných N; proměnná Hustota (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1899,5, sv = 194,00								
Č. buňky	Poloha ve kmene	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
1	A-střed	1073,8	1027,6	1035,6	1042,6	1047,4	1056,1	1023,8
2	B		0,056738	0,198474	0,438065	0,643649	0,935183	0,245376
3	C	0,056738		0,981484	0,723263	0,574717	0,596202	0,999998
4	D	0,198474	0,981484		0,991922	0,942801	0,877658	0,998164
5	E	0,438065	0,723263	0,991922		0,999514	0,982909	0,977935
6	F	0,643649	0,574717	0,942801	0,999514		0,998478	0,932627
7	G	0,935183	0,596202	0,877658	0,982909	0,998478		0,755027
7	G	0,245376	0,999998	0,998164	0,977935	0,932627	0,755027	

Tab. 32: Statistická analýza meze pevnosti po světových stranách

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Mez pevnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	84389,78	1	84389,78	3762,561	0,00
Světová strana	2467,14	4	616,78	27,500	0,00
Chyba	4396,05	196	22,43		

Tab. 33: Tukeyho test statistického porovnání meze pevnosti po světových stranách

HSD při nestejných N; proměnná Mez pevnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 22,429, sv = 196,00						
Č. buňky	Světová strana	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	Sever	24,725	25,636	25,939	25,562	12,212
2	Jih		0,884242	0,805023	0,912499	0,000017
3	Východ	0,884242		0,998741	0,999992	0,000017
4	Západ	0,805023	0,998741		0,997038	0,000017
5	Střed	0,912499	0,999992	0,997038		0,000017
5	Střed	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017	

Tab. 34: Statistická analýza meze pevnosti po výšce kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Mez pevnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	108108,0	1	108108,0	4890,502	0,000000
Číslo kmene	355,1	3	118,4	5,354	0,001481
Chyba	4023,2	182	22,1		

Tab. 35: Tukeyho test statistického porovnání meze pevnosti po výšce kmene

Č. buňky	Číslo kmene	HSD při nestejných N; proměnná Mez pevnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 22,106, sv = 182,00			
		{1}	{2}	{3}	{4}
		25,413	23,975	25,866	28,476
1	1		0,457857	0,967120	0,120668
2	2	0,457857		0,149934	0,006430
3	4	0,967120	0,149934		0,235750
4	5	0,120668	0,006430	0,235750	

Tab. 36: Statistická analýza meze pevnosti po poloměru kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Mez pevnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	63867,83	1	63867,83	5952,740	0,00
Poloha ve kmene	4781,73	6	796,96	74,279	0,00
Chyba	2081,45	194	10,73		

Tab. 37: Tukeyho test statistického porovnání meze pevnosti po poloměru kmene

Č. buňky	Poloha ve kmene	HSD při nestejných N; proměnná Mez pevnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 10,729, sv = 194,00						
		{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		12,212	27,176	28,716	26,841	21,489	17,920	18,261
1	A-stred		0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000103	0,004158
2	B	0,000026		0,335822	0,999315	0,000026	0,000026	0,000026
3	C	0,000026	0,335822		0,138542	0,000026	0,000026	0,000026
4	D	0,000026	0,999315	0,138542		0,000026	0,000026	0,000028
5	E	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026		0,060177	0,433262
6	F	0,000103	0,000026	0,000026	0,000026	0,060177		0,999993
7	G	0,004158	0,000026	0,000026	0,000028	0,433262	0,999993	



Tab. 38: Statistická analýza poměrné deformace na mezi pevnosti po světových stranách

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Epsilon (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	118,5152	1	118,5152	78,09850	0,000000
Světová strana	5,5085	4	1,3771	0,90749	0,460607
Chyba	297,4317	196	1,5175		

Tab. 39: Statistická analýza poměrné deformace na mezi pevnosti po výšce kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné délkové prodloužen. Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	82,2704	1	82,27045	60,53975	0,000000
Číslo kmene	11,6003	3	3,86676	2,84541	0,039043
Chyba	247,3288	182	1,35895		

Tab. 40: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi pevnosti po výšce kmene

Č. buňky	HSD při nestejných N; proměnná Poměrné délkové prodloužení (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1,3589, sv = 182,00				
	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
1	1	,54739	1,0935	,54709	,67348
2	2	0,110819	0,110819	0,066637	0,612821
3	4	1,000000	0,066637		0,983031
4	5	0,983148	0,612821	0,983031	

Tab. 41: Statistická analýza poměrné deformace na mezi pevnosti po poloměru kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné délkové prodloužen Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	146,9888	1	146,9888	108,3693	0,000000
Poloha ve kmeni	39,8046	6	6,6341	4,8911	0,000111
Chyba	263,1356	194	1,3564		

Tab. 42: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi pevnosti po poloměru kmene

		HSD při nestejných N; proměnná Poměrné délkové prodloužení (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1,3564, sv = 194,00						
Č. buňky	Poloha ve kmene	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		1,2893	,46434	,47415	,66025	1,2540	,84071	2,3387
1	A-stred		0,453634	0,468933	0,757356	1,000000	0,949810	0,546551
2	B	0,453634		1,000000	0,989177	0,118125	0,978921	0,021907
3	C	0,468933	1,000000		0,991770	0,127861	0,981590	0,023123
4	D	0,757356	0,989177	0,991770		0,430992	0,999636	0,060279
5	E	1,000000	0,118125	0,127861	0,430992		0,966278	0,505275
6	F	0,949810	0,978921	0,981590	0,999636	0,966278		0,134400
7	G	0,546551	0,021907	0,023123	0,060279	0,505275	0,134400	

Tab. 43: Statistická analýza meze úměrnosti po světových stranách

		Jednorozměrné testy významnosti pro Napětí na mezi úměrnosti (Tabulka30) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p	
Abs. člen	49059,87	1	49059,87	2022,407	0,000000	
Světová strana	2199,70	4	549,93	22,670	0,000000	
Chyba	4536,28	187	24,26			

Tab. 44: Tukeyho test statistického porovnání meze úměrnosti po světových stranách

		HSD při nestejných N; proměnná Napětí na mezi úměrnosti (Tabulka30) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 24,258, sv = 187,00				
Č. buňky	Světová strana	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		19,375	20,382	20,809	20,156	7,6667
1	Sever		0,873293	0,751253	0,946107	0,000017
2	Jih	0,873293		0,996532	0,999434	0,000017
3	Východ	0,751253	0,996532		0,982421	0,000017
4	Západ	0,946107	0,999434	0,982421		0,000017
5	Stred	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017	

Tab. 45: Statistická analýza meze úměrnosti po výšce kmene

		Jednorozměrné testy významnosti pro Napětí na mezi úměrnosti Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p	
Abs. člen	60709,68	1	60709,68	2443,285	0,000000	
Číslo kmene	209,97	3	69,99	2,817	0,040606	
Chyba	4398,02	177	24,85			

Tab. 46: Tukeyho test statistického porovnání meze úměrnosti po výšce kmene

HSD při nestejných N; proměnná Napětí na mezi úměrnosti (MPa) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 24,848, sv = 177,00					
Č. buňky	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
		20,630	18,833	20,713	22,167
1	1		0,308523	0,999821	0,791700
2	2	0,308523		0,203567	0,185632
3	4	0,999821	0,203567		0,817882
4	5	0,791700	0,185632	0,817882	

Tab. 47: Tukeyho test statistického porovnání meze úměrnosti po poloměru kmene

Jednorozměrné testy významnosti pro Napětí na mezi úměrnosti Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	37351,75	1	37351,75	3005,779	0,00
Poloha ve kmeni	4459,49	6	743,25	59,811	0,00
Chyba	2348,64	189	12,43		

Tab. 48: Tukeyho test statistického porovnání meze úměrnosti po poloměru kmene

HSD při nestejných N; proměnná Napětí na mezi úměrnosti (MPa) (Tabulka46) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 12,427, sv = 189,00								
Č. buňky	Poloha ve kmeni	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		7,6667	22,010	23,171	22,073	15,950	13,107	13,125
1	A-střed		0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000886	0,032154
2	B	0,000026		0,782489	1,000000	0,000026	0,000026	0,000034
3	C	0,000026	0,782489		0,824317	0,000026	0,000026	0,000026
4	D	0,000026	1,000000	0,824317		0,000026	0,000026	0,000033
5	E	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026		0,332676	0,680597
6	F	0,000886	0,000026	0,000026	0,000026	0,332676		1,000000
7	G	0,032154	0,000034	0,000026	0,000033	0,680597	1,000000	

Tab. 49: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti po světových stranách (extenzometr)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-extenzometr Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	4,376489	1	4,376489	112,3299	0,000000
Světová strana	0,073395	4	0,018349	0,4710	0,757014
Chyba	7,285717	187	0,038961		

Tab. 50: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti po výšce kmene (extenzometr)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-extenzometr Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	3,423217	1	3,423217	89,72207	0,000000
Číslo kmene	0,308428	3	0,102809	2,69462	0,047547
Chyba	6,753181	177	0,038154		

Tab. 51: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi úměrnosti po výšce kmene (ex.)

HSD při nestejných N; proměnná Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-extenzometr Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = ,03815, sv = 177,00					
Č. buňky	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
1	1	,18370			
2	2		0,942729	0,333130	0,696162
3	4		0,070894		0,999982
4	5	0,696162	0,473030	0,999982	

Tab. 52: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti po poloměru kmene (ex.)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-extenzometr Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	3,629197	1	3,629197	92,71779	0,000000
Poloha ve kmeni	0,139182	6	0,023197	0,59263	0,735991
Chyba	7,397913	189	0,039142		

Tab. 53: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti po světových stranách (příčník)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-příčník Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1457,778	1	1457,778	3149,189	0,000000
Světová strana	6,314	4	1,579	3,410	0,010177
Chyba	86,563	187	0,463		

Tab. 54: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi úměrnosti po světových stranách (př.)

HSD při nestejných N; proměnná Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-příčnik (%) (Tabulka20) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = ,46291, sv = 187,00						
Č. buňky	Světová strana	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	Sever	3,1523	0,999334	0,974124	0,999828	0,078787
2	Jih	0,999334		0,994593	0,993582	0,055040
3	Východ	0,974124	0,994593		0,943835	0,025709
4	Západ	0,999828	0,993582	0,943835		0,100243
5	Střed	0,078787	0,055040	0,025709	0,100243	

Tab. 55: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti na po výšce kmene (př.)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1506,702	1	1506,702	3855,334	0,000000
Číslo kmene	8,053	3	2,684	6,869	0,000211
Chyba	69,173	177	0,391		

Tab. 56: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi pevnosti po výšce kmene (př.)

HSD při nestejných N; proměnná Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti (příčnik) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = ,39081, sv = 177,00					
Č. buňky	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
1	1	3,4630	0,001287	0,016129	0,999923
2	2	0,001287		0,858807	0,110094
3	4	0,016129	0,858807		0,276466
4	5	0,999923	0,110094	0,276466	

Tab. 57: Statistická analýza poměrné deformace na mezi úměrnosti po poloměru kmene (př.)

Jednorozměrné testy významnosti pro Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-příčnik Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1154,465	1	1154,465	3079,428	0,000000
Poloha ve kmene	22,982	6	3,830	10,217	0,000000
Chyba	70,855	189	0,375		

Tab. 58: Tukeyho test statistického porovnání poměrné deformace na mezi úměrnosti po poloměru kmene (př.)

HSD při nestejných N; proměnná Poměrné přetvoření na mezi úměrnosti-příčnik (%) (Tabulka35) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = ,37490, sv = 189,00								
Č. buňky	Poloha ve kmene	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		2,5173	3,4492	3,2697	3,3559	2,7877	2,6364	2,5713
1	A-stred		0,000623	0,013502	0,003349	0,890930	0,998661	0,999998
2	B	0,000623		0,862406	0,993172	0,000582	0,008108	0,062794
3	C	0,013502	0,862406		0,996431	0,037144	0,089340	0,252858
4	D	0,003349	0,993172	0,996431		0,006020	0,030998	0,137529
5	E	0,890930	0,000582	0,037144	0,006020		0,994929	0,992236
6	F	0,998661	0,008108	0,089340	0,030998	0,994929		0,999992
7	G	0,999998	0,062794	0,252858	0,137529	0,992236	0,999992	

Tab. 59: Statistická analýza modulu pružnosti po světových stranách

Jednorozměrné testy významnosti pro Modul pružnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1,379494E+10	1	1,379494E+10	1483,577	0,000000
Světová strana	5,094774E+08	4	1,273693E+08	13,698	0,000000
Chyba	1,822492E+09	196	9,298429E+06		

Tab. 60: Tukeyho test statistického porovnání modulu pružnosti po světových stranách

HSD při nestejných N; proměnná Modul pružnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 9298E3, sv = 196,00						
Č. buňky	Světová strana	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		9996,9	11083,	10232,	10248,	4562,1
1	Sever		0,417808	0,997396	0,994681	0,000027
2	Jih	0,417808		0,751543	0,647629	0,000017
3	Východ	0,997396	0,751543		1,000000	0,000020
4	Západ	0,994681	0,647629	1,000000		0,000020
5	Stred	0,000027	0,000017	0,000020	0,000020	

Tab. 61: Statistická analýza modulu pružnosti po výšce kmene

Jednorozměrné testy významnosti pro Modul pružnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1,826106E+10	1	1,826106E+10	1910,124	0,000000
Číslo kmene	8,356900E+07	3	2,785633E+07	2,914	0,035730
Chyba	1,739946E+09	182	9,560144E+06		



Tab. 62: Tukeyho test statistického porovnání modulu pružnosti po výšce kmene

HSD při nestejných N; proměnná Modul pružnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 9560E3, sv = 182,00					
Č. buňky	Číslo kmene	{1}	{2}	{3}	{4}
		10016,	10021,	10481,	12114,
1	1		1,000000	0,888222	0,097670
2	2	1,000000		0,863611	0,099157
3	4	0,888222	0,863611		0,277779
4	5	0,097670	0,099157	0,277779	

Tab. 63: Statistická analýza modulu pružnosti po poloměru kmene

Jednorozměrné testy významnosti pro Modul pružnosti (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1,055946E+10	1	1,055946E+10	1382,676	0,00
Poloha ve kmeni	8,503960E+08	6	1,417327E+08	18,559	0,00
Chyba	1,481573E+09	194	7,636977E+06		

Tab. 64: Tukeyho test statistického porovnání modulu pružnosti po poloměru kmene

HSD při nestejných N; proměnná Modul pružnosti (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 7637E3, sv = 194,00								
Č. buňky	Poloha ve kmeni	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		4562,1	10718,	11961,	11023,	9257,9	7291,3	7242,3
1	A-střed		0,000026	0,000026	0,000026	0,000088	0,121983	0,453790
2	B	0,000026		0,391426	0,998940	0,385296	0,017915	0,153618
3	C	0,000026	0,391426		0,734342	0,002895	0,000177	0,011394
4	D	0,000026	0,998940	0,734342		0,168736	0,006518	0,089417
5	E	0,000088	0,385296	0,002895	0,168736		0,491774	0,769370
6	F	0,121983	0,017915	0,000177	0,006518	0,491774		1,000000
7	G	0,453790	0,153618	0,011394	0,089417	0,769370	1,000000	

Tab. 65: Statistická analýza práce po světových stranách

Jednorozměrné testy významnosti pro Práce (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy					
Efekt	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	52460605	1	52460605	78,40196	0,000000
Světová strana	642451	4	160613	0,24003	0,915403
Chyba	131148242	196	669124		

Tab. 66: Statistická analýza práce po výšce kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Práce (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SC	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	49447292	1	49447292	79,29335	0,000000
Číslo kmene	3243952	3	1081317	1,73399	0,161617
Chyba	113495104	182	623599		

Tab. 67: Statistická analýza práce po poloměru kmene

Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro Práce (Tabulka1) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SC	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	61312526	1	61312526	98,35677	0,000000
Poloha ve kmeni	10857176	6	1809529	2,90282	0,009854
Chyba	120933517	194	623369		

Tab. 68: Tukeyho test statistického porovnání práce po poloměru kmene

Č. buňky	Poloha ve kmeni	HSD při nestejných N; proměnná Práce (Tabulka1) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 6234E2, sv = 194,00						
		{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		615,84	395,63	410,49	541,34	850,90	498,80	1415,6
1	A-střed		0,988269	0,991913	0,999976	0,983495	0,999719	0,398012
2	B	0,988269		1,000000	0,982422	0,277540	0,999865	0,130836
3	C	0,991913	1,000000		0,989999	0,317350	0,999946	0,143030
4	D	0,999976	0,982422	0,989999		0,733787	0,999999	0,287377
5	E	0,983495	0,277540	0,317350	0,733787		0,901926	0,785345
6	F	0,999719	0,999865	0,999946	0,999999	0,901926		0,233059
7	G	0,398012	0,130836	0,143030	0,287377	0,785345	0,233059	