

# **Posouzení působení mikrovln na zkušební tělesa při průchodu kontinuálním zařízením**

Diplomová práce

2017

**Vypracoval:**  
**Bc. Ondřej Šitta**

Brno



Prohlašuji, že jsem práci: *Posouzení působení mikrovln na zkušební tělesa při průchodu kontinuálním zařízením* vypracoval 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 a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

*V Brně, dne 12. 4. 2017*

.....  
**Bc. Ondřej Šitta**

**Poděkování:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Aleši Dejmalovi, Ph.D., za rady, připomínky a vedení práce a především za jeho čas obětovaný mé práci. Dále chci poděkovat Ing. Jakubu Dömény, Ph.D. za čas, který mi věnoval v laboratořích a za pomoc při psaní této práce. Nakonec děkuji všem ostatním, kteří mě v mé diplomové práci jakkoliv podporovali.

# Abstrakt

## Bc. Ondřej Šitta

Posouzení působení mikrovln na zkušební tělesa při průchodu kontinuálním zařízením

Tato práce se zabývá sušením bukového dřeva pomocí mikrovln. V první části je teoreticky pojednáno obecně o dřevě a vlastnostech dřeva souvisejících se sušením. Podrobně je zde popsána dřevina buku obecného (*Fagus Sylvatica L.*) a jeho vlastnosti. Další bod teoretické části je zaměřen na mikrovlny a mikrovlnné sušení dřeva. Druhá část se zabývá samotným sušením bukových vzorků pomocí kontinuální mikrovlnné linky. Dvacet bukových vzorků bylo rozděleno na radiální a tangenciální vzorky a ty byly vkládány na pás sušičky a před každým vstupem a po každém výstupu byl daný vzorek zvážen. Tento proces byl opakován až téměř do nulové vlhkosti. Následně byly z každého vzorku odřezány malé vzorky, tři z každého kraje a tři ze středu vzorku. Tři vzorky (kraj, střed, kraj) byly použity na vidličkovou zkoušku, tři na zjištění hodnoty zkornatění pomocí zkoušky středovým řezem a tři dále rozřezány pro zjištění vlhkostního spádu. Výsledkem bylo zhodnocení sušení dřeva a jeho jakost po vysušení.

**Klíčová slova:** buk lesní, sušení dřeva, mikrovlny, mikrovlnná sušárna, vlhkost dřeva, jakost dřeva

# Abstract

**Bc. Ondřej Šitta**

Assessment of the effect of microwaves on the test sample during the passage through continuous device

This work deals with drying of the beechwood using microwaves. In the first part there is theoretically discussed the wood in general and its behavior related with drying. The beechwood is here described in detail and also its properties. Another point of the theoretical part is focused on microwaves and its use for drying wood. Second part deals with drying of the beechwood samples using continuous microwave line. Twenty beechwood samples were split on radial and tangent samples and they were put on machine belt of the drying machine. Before and after each entry through the drying machine each sample was weighed. This process was repeated till almost zero moisture of the tested sample. Then small parts were cut from each sample, three from each edge and three from the middle part of the tested sample. Three parts (edge, middle, edge) were used for prong test, three for finding the value of crustiness using the CEN test and three of them cut on even smaller parts for finding the moisture gradient. The result was evaluation of wood drying and its quality after drying.

**Keywords:** european beech, drying wood, microwave, microwave drying, wood moisture, wood quality

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a cíl práce</b>	<b>12</b>
1.1	Úvod.....	12
1.2	Cíl práce.....	12
<b>2</b>	<b>Literární přehled</b>	<b>13</b>
2.1	Buk lesní ( <i>Fagus Sylvatica L.</i> ).....	13
2.1.1	Makroskopická struktura dřeva buku.....	13
2.1.2	Mikroskopická struktura dřeva buku.....	15
2.1.3	Chemické složení dřeva buku.....	16
2.1.4	Využití buku .....	17
2.2	Fyzikální vlastnosti.....	18
2.2.1	Vlhkost dřeva .....	18
2.2.2	Rozdělení vody ve dřevě .....	19
2.2.3	Pohyb vody ve dřevě.....	19
2.2.4	Rozměrové změny spojené se změnou vlhkosti .....	21
2.2.5	Hustota dřeva .....	24
2.2.6	Pórovitost.....	25
2.3	Sušení dřeva .....	26
2.3.1	Kontrola jakosti sušení.....	26
2.3.2	Klasické sušení s konvekčním ohřevem.....	27
2.3.3	Sušení s mikrovlnným ohřevem.....	27
2.4	Mikrovlnné záření.....	28
2.4.1	Výzkum MW .....	29
2.4.2	Mikrovlnná technologie.....	30
2.4.3	Polarizace látek obsažených ve dřevě.....	32
2.5	Vliv mikrovlnného sušení na dřevo.....	33
2.5.1	Barevné změny.....	33
2.5.2	Anatomická stavba .....	33
2.5.3	Změna hustoty.....	33
2.5.4	Mechanické vlastnosti .....	34

---

2.6	Další využití mikrovln.....	34
2.6.1	Mikrovlnná technologie pro sanaci dřeva .....	34
2.6.2	Mikrovlnné sušení knih .....	34
<b>3</b>	<b>Materiál a metodika</b>	<b>36</b>
3.1	Výroba zkušebních vzorků .....	37
3.2	Parametry mikrovlnné sušárny a sušení vzorků .....	37
3.3	Příprava vzorečků .....	38
3.4	Jakostní zkoušky .....	38
3.5	Technický popis použitého zařízení .....	42
3.5.1	Kontinuální mikrovlnná linka .....	42
3.5.2	Horkovzdušná sušárna SANYO (konvenční ohřev) .....	45
3.5.3	Digitální posuvné měřítko MITUTOY .....	45
3.5.4	Laboratorní váha METTLER TOLEDO .....	46
3.5.5	Laboratorní váha Nagata FATH-12 .....	46
3.5.6	Würth infračervený laserový teploměr .....	47
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>48</b>
4.1	Změna vlhkosti po průchodu MW .....	48
4.2	Změna teploty po průchodu MW.....	49
4.3	Ztráta vlhkosti během průchodu MW .....	50
4.4	Změna ztráty vlhkosti v závislosti na snižování vlhkosti dřeva.....	51
4.5	Vlhkostní spád .....	52
4.6	Odchylka konečné vlhkosti od požadované .....	55
4.7	Vidličková zkouška .....	56
4.8	Zkouška zkornatění středovým řezem .....	59
4.9	Stupeň jakosti sušeného řeziva.....	61
<b>5</b>	<b>Diskuse</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>Summary</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>Literatura</b>	<b>68</b>



## Seznam obrázků

Obr. 1 Řezy bukem, A - příčný řez, B - tangenciální řez, C - radiální řez. ....	14
Obr. 2 Kapilární elevace vody ve dřevě. ....	20
Obr. 3 Důsledky vnitřních napětí ve dřevě .....	23
Obr. 4 Příklady příčného borcení dřeva na různých průřezech kmene.....	23
Obr. 5 Příklady podélného borcení dřeva .....	24
Obr. 6 Podíl dřevní substance a pórů v závislosti na hustotě .....	26
Obr. 7 Elektromagnetické spektrum. ....	29
Obr. 8 Vlhkostní spád pro řezivo do 50 mm.....	38
Obr. 9 Vzorek pro vidličkovou zkoušku.....	39
Obr. 10 Vyhodnocení vidličkové zkoušky .....	39
Obr. 11 postup přípravy vzorků a vyhodnocení při zkoušce zkornatění středovým řezem .....	40
Obr. 12 Zkouška zbytkového napětí vidličkovou zkouškou.....	41
Obr. 13 Vzorečky na zkoušku vlhkostního spádu a zkoušky zkornatění. ....	41
Obr. 14 Zkouška zkornatění - vzorky vidličkové zkoušky.....	41
Obr. 15 Schéma mikrovlnné kontinuální sušárny.....	42
Obr. 16 Mikrovlnná linka v laboratořích Mendelovy univerzity v Útěchově u Brna ....	42
Obr. 17 Pásový dopravník se vzorkem buku a s hliníkovým stíněním pro minimální únik mikrovln. ....	43
Obr. 18 Mikrovlnný generátor s řídicí jednotkou. ....	44
Obr. 19 Zařízení na úpravu geometrie mikrovlny. ....	44
Obr. 20 Horkovzdušná sušárna SANYO. ....	45
Obr. 21 Digitální posuvné měřítko MITUTOY.....	45
Obr. 22 Laboratorní váha METTLER TOLEDO. ....	46
Obr. 23 Laboratorní váha Nagata FATH-12 s bukovým vzorkem. ....	46
Obr. 24 Würth infračervený laserový teploměr. ....	47
Obr. 25 Vlhkostní spád, graf vyjadřuje snižování vlhkosti během průjezdu kontinuálním mikrovlnným zařízením v závislosti na čase.....	48

---

Obr. 26 Teplota vzorku před vstupem a po výstupu z MW sušárny. ....	49
Obr. 27 Ztráta vlhkosti vyjádřená v gramech v radiálním směru vláken. ....	50
Obr. 28 Ztráta vlhkosti vyjádřená v gramech v tangenciálním směru vláken. ....	50
Obr. 29 Změna vlhkosti při vysoušení vzorků u vzorků s radiální orientací vláken. ....	51
Obr. 30 Změna vlhkosti při vysoušení vzorků u vzorků s tangenciální orientací vláken. .....	51
Obr. 31 Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken.....	52
Obr. 32 Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken.....	52
Obr. 33 Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken.....	53
Obr. 34 Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken. ....	53
Obr. 35 Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken.. ....	54
Obr. 36 Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken.. ....	54
Obr. 37 Odchylka konečné vlhkosti od požadované u vzorků s radiální orientací vláken. .....	55
Obr. 38 Odchylka konečné vlhkosti od požadované u vzorků s tangenciální orientací vláken.....	56
Obr. 39 Vidličková zkouška u vzorků s radiálním řezem.....	57
Obr. 40 Vidličková zkouška u vzorků s tangenciálním řezem. ....	58
Obr. 41 Zkouška zkornatění středovým řezem vzorků s radiální orientací. ....	59
Obr. 42 Zkouška zkornatění středovým řezem vzorků s tangenciální orientací.....	60

## Seznam tabulek

Tab. 1 Zařazení vysušeného řeziva do jakostní třídy a následné určení vhodnosti použití materiálu.....	40
Tab. 2 Určení stupně jakosti vysušeného bukového dřeva.....	62

# 1 Úvod a cíl práce

## 1.1 Úvod

Dřevo patří mezi nejstarší přírodní materiály s nejrůznějším využitím. Díky novým poznatkům vlastností, chemického složení a struktury dřeva se intenzivně rozvíjí i nové technologie samotného zpracování a úpravy dřeva. Tento přírodní materiál je, na rozdíl od jiných, neustále obnovitelný a díky svému přírodnímu charakteru a přírodní kresbě, je velmi důležitým materiálem v životním prostředí člověka.

Dřevo je žádaný materiál pro své vlastnosti. Ve srovnání například s betonem je velmi pružný, přitom je i pevný a hlavně je velmi lehký. Oproti jiným konstrukčním materiálům má i dobré tepelně-izolační vlastnosti, tlumí vibrace a je lehce opracovatelný.

Mezi negativní vlastnosti dřeva patří rozměrová nestálost a změna vlastností při změnách vlhkosti, hořlavost, různé růstové vady a malá odolnost vůči dřevokazným houbám a hmyzu.

I když má dřevo spoustu nedostatků, můžeme jim předcházet různými úpravami jako jsou například lisování, plastifikace, ochranné nátěry nebo mechanická změna materiálu na dřevotřískové, dřevovláknité desky a další (Gandelová et al., 2009).

## 1.2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je posouzení vlivu mikrovln na vzorky bukového dřeva při průchodu kontinuálním mikrovlnným zařízením a následný popis problematiky využití mikrovlnného ohřevu k úpravě vlastností dřeva. Jednotlivé vzorky budou zkoumány a podle příslušných norem vyhodnocena výsledná jakost sušení. Práce se zabývá odchylkou konečné vlhkosti od vlhkosti požadované, kolísání konečné vlhkosti na každém vzorku, vlhkostním spádem a zbytkovým napětím ve dřevě po vysušení.

## 2 Literární přehled

### 2.1 Buk lesní (*Fagus Sylvatica L.*)

Buk patří v České republice mezi nejčastější listnaté dřeviny a jeho procentuelní podíl ze skladby lesů se stále zvyšuje. Zaujímá plochu 211 835 ha, což činí 8,2 % (<http://eagri.cz>).

Buk je rozšířen po celé Evropě od Švédska až po Sicílii a od Velké Británie až po východ Ruska. U nás se vyskytuje v nadmořských výškách 400-800 m, často v nesmíšených porostech. Strom dorůstá do výšek mezi 35-45 metry a jeho objem může dosahovat až na 30 m<sup>3</sup> (Úradníček, 2001).

Procentuelní zastoupení částí stromu jsou: kmen (55-75 %), kořeny (20-25 %) a větve (10-20 %). Jedná se o středně těžkou a středně tvrdou dřevinu. Je málo odolná vůči biotickým činitelům a méně trvanlivá (Gandelová et al., 2009).

#### 2.1.1 Makroskopická struktura dřeva buku

Dřevo patří do skupiny dřev s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. Jeho barva je bílá s nádechem do růžova. Dřevo buku patří mezi bělové s vyžralým dřevem. Často se vytváří nepravé jádro červenohnědé barvy (Grosser, 1977).

Dřeňové paprsky jsou viditelné pouhým okem na všech třech řezech. Na příčném řezu tvoří pásy probíhající kolmo na letokruhy od středu stromu ven. Radiální řez je tvořen tzv. zrcátky, které jsou vysoké několik mm, a výrazně ovlivňují kresbu dřeva. Na tangenciálním řezu jsou tmavé čárky vysoké až 5 mm (Šlezingerová, J., Gandelová, L. 1999).



**Obr. 1 Řezy bukem**, A - příčný řez, B - tangenciální řez, C - radiální řez (<http://wood.mendelu.cz>).

Každý letokruh je tvořen jarním dřevem, které vzniká na začátku činnosti kambia, je více pórovité, řidší a světlejší, a letním dřevem, které se tvoří déle, je hustší, tmavší a tenčí. Kontrastem tmavé letní vrstvy dřeva a světlé vrstvy jarního dřeva následujícího roku lze ohraničit letokruh. Letokruhy buku jsou obtížně rozlišitelné, ale v porovnání s ostatními roztroušeně pórovitými dřevy, je viditelnost letokruhů dobrá (Lesnický naučný slovník, 1994).

Běl se nachází na vnější části kmene. Obsahuje živé parenchymatické buňky v dřevním parenchymu a dřeňových paprscích. Vodivé elementy jsou v bělovém dřevě průchozí a je jimi vedena voda s minerálními látkami. V běli jsou ukládány i zásobní látky (Požgaj et al., 1997).

Vyzrálé dřevo se nachází ve středu kmene. Je viditelné na čerstvě pokácené kulatině, protože má světlejší barvu než běl. Světlejší barva je zde kvůli menšímu obsahu vody. S vysycháním kulatiny se barevné rozdíly ztrácí (Požgaj et al., 1997).

U buku se často vyskytuje tzv. nepravé jádro červenohnědé barvy. Nepravé jádro vzniká velkým přísunem vzduchu, což bývá zapříčiněno mechanickým poraněním nebo snížením vitality parenchymatických buněk v důsledku například nízké teploty nebo působením dřevokazných hub (Nečesaný, 1958).

### **2.1.2 Mikroskopická struktura dřeva buku**

V mikroskopické struktuře je většina anatomických elementů pouhým okem neviditelná, mezi výjimky patří například cévy. Protože jsou tyto anatomické elementy mnohem složitější než u dřeva jehličnatých stromů, jsou specializované na různé funkce. Mezi základní mikroskopické elementy s vodivou funkcí jsou řazeny cévy a cévice. Parenchymatické buňky mají funkci zásobní a vodivou. Funkci mechanickou mají vláknité tracheidy a libriformní vlákna.

Cévy, nebo také tracheje, jsou vodivé elementy u listnatých dřevin. U bukového dřeva dosahují délek 0,8-2 m. Tyto kapiláry tvoří v bělové části dřeva axiální síť, kde je vedena voda s rozpuštěnými minerálními látkami od kořenů po korunu. Sítě jsou vždy propojeny jen v rámci jednoho letokruhu. Samotné cévy se skládají z cévních článků - mrtvých buněk uložených nad sebou, jejichž příčné buněčné stěny se v průběhu diferenciací cévy rozrušily. Zbytky těchto přehrádek nazýváme perforace. Ta se u buku vyskytuje jako jednoduchá - v cévách jarního dřeva, a žebříčková - úzkých cévách letního dřeva. U buku je velmi časté zanesení cév thylami nebo jádrovými látkami, což u nich omezí nebo úplně vyřadí vodivou funkci.

Uspořádání cév je rovnoměrné a jejich průřezy podobné v celém letokruhu. Kvůli tomu nelze rozlišit jarní a letní dřevo a proto je buk označován jako listnatá dřevina s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva.

Cévice, nebo také tracheidy mají vedle mechanické a zásobní funkce převážně funkci vodivou. Podle tvaru a funkce rozlišujeme tracheidy cévovité, vláknité a vazicentrické.

Cévovité tracheidy tvoří přechod mezi tracheidami jehličnanů a cévami listnáčů. Jedná se o uzavřené protáhlé buňky, delší než cévní články, ale kratší než tracheidy jehličnanů. Jejich délka se pohybuje do půl milimetru. Funkce je stejná jako u cév, vodivá. Nevyskytují se u všech listnatých dřevin, pro buk jsou však typické.

Vazicentrické tracheidy jsou uzavřené zakulacené buňky, vyskytující se v bezprostřední blízkosti cév. Mohou se podílet na vodivé funkci, avšak netvoří žádné axiální vodivé dráhy.

Vláknité tracheidy představují přechod mezi tracheidami jehličnanů a libriformními vlákny listnáčů. Jedná se o uzavřené, protáhlé a zašpičatělé buňky. Jejich funkce je především mechanická, ale může plnit i funkci vodivou a zásobní. U buku je jejich výskyt velmi četný.

Libriformní vlákna jsou podstatnou součástí základního pletiva většiny listnáčů. U buku se vyskytují kolem 37 %, což je oproti jiným listnatým dřevinám méně. Jejich funkce je mechanická. Buňky jsou protáhlé se zašpičatělými konci. Diferencovaná libriformní vlákna patří mezi mrtvé elementy. Jsou uložena axiálně a jejich průřez tvoří 4-6 úhelníkový tvar.

Parenchymatické buňky mají funkci vodivou a zásobní, přičemž ukládají převážně škrob, tuky a bílkoviny. Jejich tvar může být různý, ať už ve tvaru hranolů, krychlí, zploštělých válečků nebo vřeten. Tyto buňky si uchovávají cytoplazmu jak v bělovém dřevě tak i ve vyzrálém a proto to jsou buňky živé. Ve směru podélné osy kmene tvoří buňky axiální parenchym (podélný dřevní parenchym) a ve směru kolmém na osu kmene buňky tvoří parenchym radiální, který se seskupuje v dřeňové paprsky (Šlezingerová, J., Gandelová, L. 1999).

### **2.1.3 Chemické složení dřeva buku**

Dřevo se skládá z komplexu různých látek, z nichž jsou nejzákladnější přírodní polymery celulóza, hemicelulóza a lignin. Tyto látky jsou v dřevním komplexu zastoupeny z 90-97 %. Dalších 3-10 % tvoří doprovodné složky dřeva.

Celulóza je polysacharid, který zastává stavební funkci. Tvoří podstatnou část buněčných stěn a vytváří kostru zdřevnatělých buněk. Ve dřevě listnatých stromů se nachází zhruba 41-48 % celulózy, konkrétně u buku je to kolem 39 %. Celulóza velmi ovlivňuje absorpci vody do dřeva tím, že se voda absorbuje na volné OH skupiny



amorfních oblastí celulózy na povrch krystalů. Podíl amorfni a krystalické části určuje pružnost, bobtnání a další fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

Hemicelulóza je další zástupce polysacharidů, přičemž je zastoupena v průměru 15-35 %. Obsah hemicelulózy ve dřevě buku je kolem 35 %. Hemicelulóza tvoří pojivo mezi celulózou v buněčných stěnách a ligninem. Podle základních monosacharidů se dělí na xylany, manany a galaktany, přičemž nejdůležitější hemicelulózou u listnáčů jsou s největším zastoupením právě xylany. Manany a galaktany jsou u buku zastoupeny zhruba 3 %.

Lignin dodává dřevu pevnost. Obaluje polysacharidy buněčné stěny, s nimiž je spojen pomocí chemických vazeb a tvoří tzv. lignopolysacharidové komplexy. Ukládání ligninu do stěn buněk nazýváme lignifikace nebo také dřevnatění. Ve dřevě listnatých stromů se vyskytuje v rozmezí 15-30 %, u buku je to zhruba 21 %. Lignin je makromolekulární látka aromatické povahy s velkou absorpcí světla. Chemicky je stálejší než celulóza, ale více podléhá vlivům zásad a kyselin.

Doprovodné látky dřeva jsou látky s různou chemickou povahou a ve dřevě se vyskytují v malém množství (1-5 %). Vyskytují se v buněčných stěnách, lumenech anatomických elementů i v mezibuněčných prostorech. Ovlivňují barvu, vůni dřeva, ale i fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, opracování, impregnaci, sušení apod. Doprovodné látky rozdělujeme do dvou skupin - anorganické a organické (sacharidy, fenolické látky, terpeny, bílkoviny, acyklické kyseliny aj.).

#### **2.1.4 Využití buku**

Buk je pravděpodobně nejoblíbenější dřevo s velmi širokým využitím. Dobře se ohýbá, proto se z něj vyrábí ohýbaný nábytek, židle, školní lavice a podobně. Využívá se v interiérové truhlářině a po patřičném ošetření i v exteriérech. Po impregnaci slouží jako železniční pražce, telefonní sloupy. Využívá se jako konstrukční materiál. Soustruží se z něj rukojeti pracovních nástrojů a kartáčů, cívky, dřevěné výrobky do domácnosti, sportovní nářadí, části hudebních nástrojů, dekorativní pažby loveckých

zbraní a podlahy do domácností. Je také používán na výrobky z ohýbaného dřeva a na sudy. Loupe se z něj dýha na výrobu překližek a krájením se získávají dekorativní dýhy. (<http://prace-se-drevem.spibi.cz>)

## 2.2 Fyzikální vlastnosti

### 2.2.1 Vlhkost dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, což znamená, že je schopné přijímat nebo odevzdávat vodu v kapalném nebo plynném skupenství. Kvůli hygroskopicitě je voda ve dřevě obsažena prakticky pořád. Voda ve dřevě ovlivňuje jeho vlastnosti a ve většině případů je zhoršuje. Jedná se především o změnu hustoty, rozměrů, odolnosti proti dřevokazným houbám a napadení hmyzem, fyzikální a mechanické vlastnosti a samotné zpracování dřeva.

Absolutní vlhkost ( $w_{\text{abs}}$ ) je vyjádřena podílem hmotnosti vody a hmotnosti absolutně suchého dřeva.

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 (\%)$$

$w_{\text{abs}}$  – absolutní vlhkost [%]

$m_w$  – hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$  [kg, g]

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg, g]

Rozložení vlhkosti ve kmene stromu je nerovnoměrné a mění se s výškou kmene. Od středu kmene směrem ven je vlhkost u listnatých stromů rozložena rovnoměrněji než u jehličnatých. Mění se i v průběhu roku, v zimním období je maximální a v letním minimální. Vlhkost se pohybuje v rozmezí 70-90 %.

### 2.2.2 Rozdělení vody ve dřevě

Voda se ve dřevě rozděluje do tří skupin – voda volná, vázaná a chemicky vázaná.

**Voda volná**, nebo také kapilární vyplňuje ve dřevě lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Vyskytuje se pouze za přítomnosti vody vázané, to znamená při vlhkosti od 30 % do 150-200 %. Méně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti než voda vázaná.

**Voda vázaná**, nebo také hygroskopická je přítomna v buněčných stěnách a váže se na hydroxilové skupiny celulózy a hemicelulóz. Má největší vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti a je obsažena 0-30 %.

**Voda chemicky vázaná** je obsažena v chemických sloučeninách. Nelze odstranit sušením, pouze spálením. Voda chemicky vázaná je obsažena v 1-2 % dřeva a nemá žádný vliv na jeho vlastnosti.

Hranici mezi vodou vázanou a vodou volnou tvoří tzv. mez hygroskopicity. Ta se pohybuje od 22-35 % vlhkosti v závislosti na dřevině. U buku je to okolo 33 %.

### 2.2.3 Pohyb vody ve dřevě

Pohyb vody ve dřevě je rozdělen na pohyb vody vázané (difuze) a pohyb vody volné (kapilární elevace, propustnost).

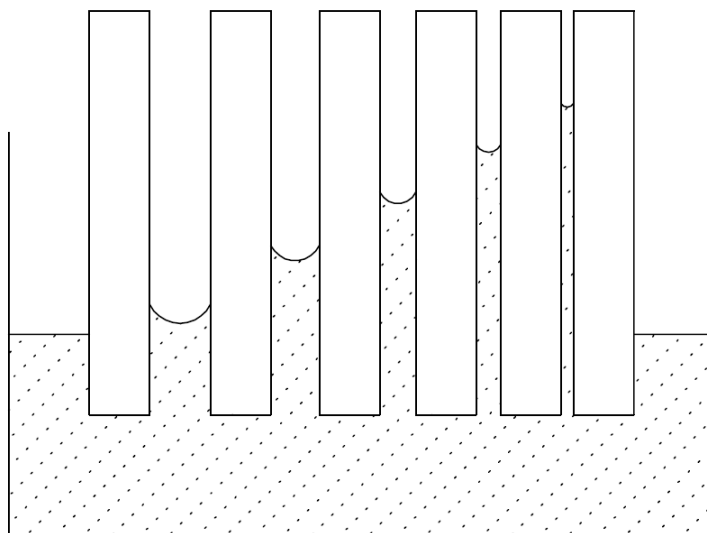
Difuze je pohyb vody vázané ve dřevě. Pokud je ve dřevě nerovnoměrně rozložena vlhkost, je vyvolán pohyb, neboli difuze, díky čemuž je ve dřevě vyrovnána vlhkost. Difuze je označena jako molekulární tok, který je způsobený nenulovým gradientem koncentrace, při kterém se látka snaží najít koncentraci rovnovážnou. K vyvolání tohoto pohybu není zapotřebí statický tlak, ale pouze gradient koncentrace. Ten znázorňuje nerovnoměrně rozloženou vlhkost ve dřevě, nerovnoměrně rozložené tepelné pole nebo chemický potenciál vody. Stav, kde je difuze neměnná v čase a mění se pouze vzdáleností, se popisuje podle 1. Fickova zákona.

Difuze vody ve dřevě roste spolu s vlhkostí a teplotou. S rostoucí vlhkostí klesá vazebná energie mezi sorpčními místy a molekulami vody, ale jen do meze hygroskopicity. Po překročení meze hygroskopicity se makrokapiláry dřeva začínají zaplňovat molekulami kapalně vody, které jsou méně pohyblivé, a tím je koeficient difuze snižován.

Teplota velmi ovlivňuje difuzi vody ve dřevě. S rostoucí teplotou roste i intenzita pohybu molekul vody, ať už v plynném nebo kapalném skupenství.

Rozdílné hodnoty difuze v podélném a příčném směru jsou dány rozdílnou pohyblivostí molekul vodní páry v lumeny a molekul vázané vody v buněčné stěně. Protáhlé lumény buněk v podélném směru tvoří vhodné vodivé cesty pro difuzi vodní páry. S rostoucí hustotou se difuze vody snižuje.

**Kapilární elevace** je pohyb volné vody v kapilární struktuře dřeva. Pohybovat se může dvěma základními pohyby, vztlínání po stěnách kapilár nebo hydrodynamickým pohybem, který je vyvolaný gradientem vnějšího tlaku.



**Obr. 2 Kapilární elevace vody ve dřevě (Požgaj et. al. 1993).**

Při kapilární elevaci má vliv na vztlínání vody její povrchové napětí, hustota vody, tíhové zrychlení a především poloměr kapilár. Z obrázku vyplývá, že při polovičním průměru kapiláry, je rychlost vztlínání dvojnásobná.

Hydrodynamický pohyb vody volné je dán rozdílem tlaku nad volnou hladinou a nad meniskem v kapiláře.

**Propustnost** dřeva je jev, při kterém dochází vlivem gradientu vnějšího tlaku k pohybu vody volné. Ustálené podmínky objemového toku kapalin (neměnná rychlost toku v čase) je popsána Darcyho zákonem.

Propustnost je dána rychlostí proudění kapaliny skrz vzorek dřeva s rozdílem tlaků na koncích vzorku. Při posunu vrstev kapaliny, které nemají stejnou rychlost, dochází k tečnému napětí uvnitř kapiláry. To se vyjadřuje dynamickou viskozitou kapaliny. Rozlišuje se proudění laminární, turbulentní a nelineární.

Koeficient  $k$  vyjadřuje počet a stav vodivých cest. Propustnost velmi závisí na druhu a anatomické struktuře dřeva, směru, rozměru dřeva, struktuře a velikosti ztenčenin v buněčné stěně. Propustnost listnatých stromů je lepší oproti jehličnatým z důvodu přítomnosti cév. Díky cévám je nejlepší propustnost v podélném směru, poté v radiálním a nakonec v tangenciálním.

#### 2.2.4 Rozměrové změny spojené se změnou vlhkosti

**Sesychání** je proces, při kterém se zmenšují rozměry, plocha nebo objem tělesa, to je zapříčiněné ztrátou vody vázané (při snížení vlhkosti pod mez nasycení buněčných stěn). Sesychání lze vyjádřit vztahem:

$$\beta_i = \frac{\alpha_{iw_1} - \alpha_{iw_2}}{\alpha_{iw_1}} \times 100 [\%]$$

$\alpha$  – rozměr tělesa, plocha, objem

$i$  – index udávající směr, plochu nebo objem

$w_1$  – vlhkost před sesycháním

$w_2$  – vlhkost po skončení sesychání

Nejvýraznější sesychání je v tangenciálním směru (3-6 %) a nejmenší v podélném směru (0,3 %). Objemové sesychání je v závislosti na jednotlivých dřevinách v rozmezí 12-15 %.

Podle objemového sesychání rozdělujeme dřeviny do tří skupin:

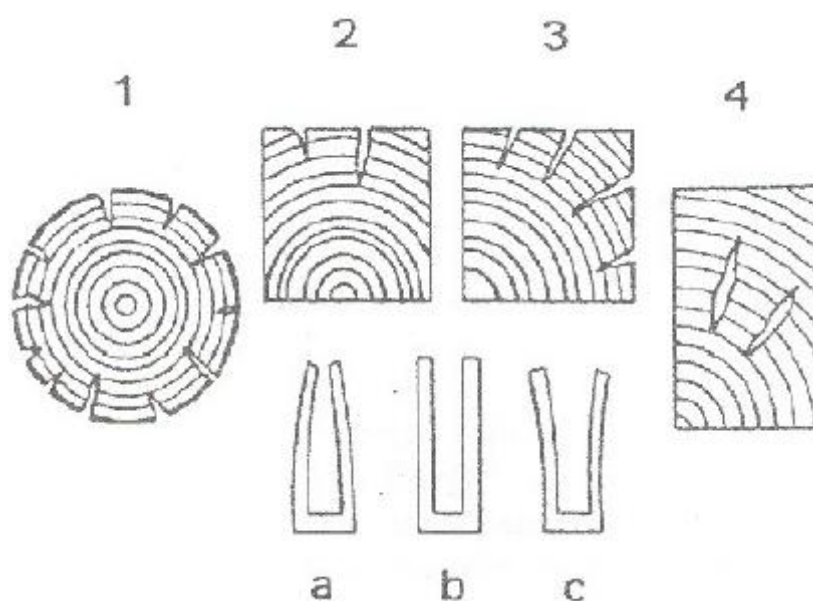
- 1) Dřeva málo sesychavá – tis, olše, vrba
- 2) Dřeva středně sesychavá – borovice, smrk, jedle, dub
- 3) Dřeva hodně sesychavá – buk, modřín, lípa

V důsledku nerovnoměrného vypařování vody ze dřeva vzniká tzv. vnitřní napětí. Rozlišují se dva druhy napětí – vlhkostní a zbytkové.

Vlhkostní napětí vzniká kvůli nerovnoměrnému vysoušení, které je zapříčiněno gradienty vlhkosti – pohyby vody ve dřevě. Toto napětí zaniká po vyrovnání vlhkostí ve dřevě.

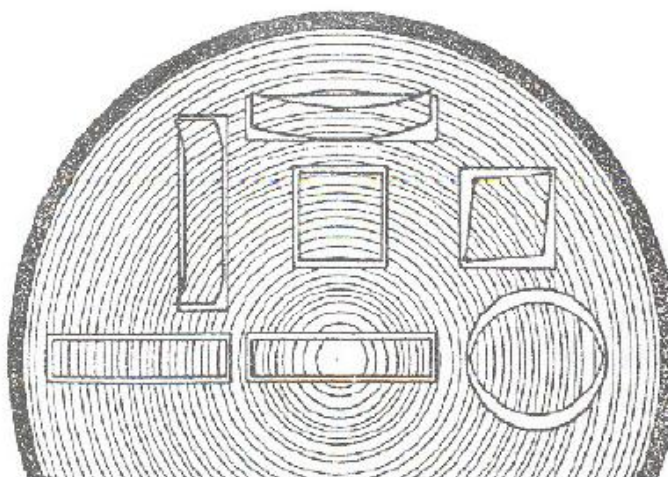
**Zbytkové napětí ve dřevě** je na rozdíl od vlhkostního napětí nevratné. Při vysychání dřeva nejprve sesychají povrchové vrstvy, které zmenšují objem. Proti tomuto sesychání působí vnitřní vrstvy dřeva, které jsou ještě nad mezí hygroskopicity a svůj objem nezmenšují. Díky tomu vzniká na povrchových vrstvách napětí tahové a na vnitřních vrstvách napětí tlakové. Při překročení tahového napětí nad mez pevnosti v tahu napříč vláken, dochází k porušení povrchových pletiv a vzniku prasklin. Při dalším vysychání jsou v tahovém napětí vnitřní vrstvy a v tlakovém vrstvy vnější. To zapříčiňuje vznik vnitřních trhlin a uzavření vnějších.

Ke vzniku trhlin dochází většinou podél dřevových paprsků. Při pomalém sušení je materiál kvalitně vysušen a jsou minimalizovány vzniky prasklin, ale je zde vyšší nárok na dodávku energie. Naopak při rychlém vysoušení dochází k většímu vzniku prasklin ale nižším nákladům na energie. Důležité je najít vhodný kompromis mezi rychlostí sušení a cenou za energie.

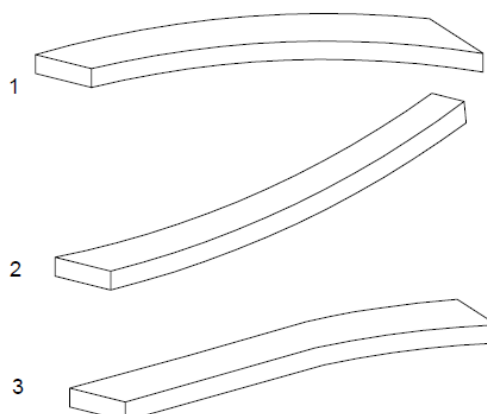


**Obr. 3** Důsledky vnitřních napětí ve dřevě, 1-3 povrchové výsušné trhliny, 4 – vnitřní trhliny, a-c vidličková zkouška, A - na povrchu tlakové a uvnitř tahové napětí, B – bez vnitřních napětí, C – na povrchu tahové a uvnitř tlakové napětí (Perelygin, 1965).

**Borcení dřeva** je jev, při kterém dřevo při sušení mění svůj tvar. Vznik tohoto jevu je zapříčiněn vnitřním napětím ve dřevě. To je způsobeno nerovnoměrným vysycháním a rozdíly sesychání v tangenciálním a radiálním směru.



**Obr. 4** Příklady příčného borcení dřeva na různých průřezech kmene (Kollmann, 1951).



**Obr. 5** Příklady podélného borcení dřeva: 1 – boční ve tvaru šavle, 2 – plošné prohnutí ve tvaru kolébky, 3 – šroubové zakřivení přes roh.

**Zkornatění (ustrnutí) dřeva** je jev, který vzniká při vysychání dřeva, na které působí větší síly, než jeho mez pružnosti a proto dřevo nemůže měnit svůj objem.

Kornatění dřeva nastává v důsledku nestejněměrného ustrnutí dřeva v jednotlivých vrstvách. V důsledku nerovnoměrného sušení a sesychání dřeva na povrchu a uvnitř může dojít k nestejnému ustrnutí povrchových a vnitřních vrstev. Pokud tahová napětí ve dřevě nepřekročí mez pevnosti, dřevo nepraskne, ale ustrne. Kornatění dřeva se projeví při jeho podélném rozřezání (Pecina P., Pecina J., 2006).

### 2.2.5 Hustota dřeva

Hustota dřeva je podíl hmotnosti a objemu dřeva, je vyjádřena jednotkou  $\text{kg}\times\text{m}^{-3}$  nebo  $\text{g}\times\text{cm}^{-3}$ . Díky hygroskopicitě dřeva je určení hustoty oproti jiným materiálům celkem obtížné. Vlhkost dřeva totiž ovlivňuje objem i hmotnost. Přesto se jedná o jednu z nejvýznamnějších charakteristik dřeva. Hustotu lze považovat za nejlepší kritérium pro posouzení vlastností dřeva.

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

$\rho$  – hustota

$m$  – hmotnost [kg, g]

$V$  – objem [ $\text{m}^3$ ,  $\text{cm}^3$ ]



Hustota dřevní substance je hmota dřeva bez veškerých dutin. Pohybuje se v rozmezí 1460-1570 kg×m<sup>-3</sup> v závislosti na chemickém složení dřeva. Hustoty základních stavebních látek buněčné stěny jsou – celulóza 1555 kg×m<sup>-3</sup>, hemicelulóza 1500 kg×m<sup>-3</sup>, lignin 1390 kg×m<sup>-3</sup>. Díky podobným poměrům těchto látek ve dřevě, prakticky nezáleží na druhu dřeviny. Hmotnost dřeva se zjišťuje vážením, objem ponořením do nebobtnající kapaliny jako je benzen nebo toluen.

Nejčastěji se pro charakteristiku hustoty používají tyto vlhkostní stavy:

- a) Hustota dřeva suchého  $w=0$  %
- b) Hustota dřeva vlhkého  $w>0$  %
- c) Hustota dřeva při  $w=12$  %

Podle hustoty jsou rozděleny dřeviny na tři skupiny:

- a)  $\rho_{12} < 540$  kg×m<sup>-3</sup> – dřeva s nízkou hustotou
- b)  $\rho_{12} = 540 - 750$  kg×m<sup>-3</sup> – dřeva se střední hustotou
- c)  $\rho_{12} > 750$  kg×m<sup>-3</sup> – dřeva s vysokou hustotou

Vyskytují se ale i extrémní hustoty, a to u exotických dřevin. Balza je pokládána za nejlehčí dřevo s hustotou pouhých  $\rho_0 = 130$  kg×m<sup>-3</sup> a naopak dřevo guajaku za nejtěžší s hustotou  $\rho_0 = 1360$  kg×m<sup>-3</sup> (Gandelová et al., 2009).

Průměrná hustota dřeva buku lesního je udávána 685 kg×m<sup>-3</sup> při nulové vlhkosti. (<http://wood.mendelu.cz>)

### 2.2.6 Pórovitost

Pórovitost dřeva určuje objem prázdných míst – pórů, v objemu suchého dřeva. Mezi póry se řadí lumeny, mezibuněčné prostory a kapilární systém v buněčných stěnách.

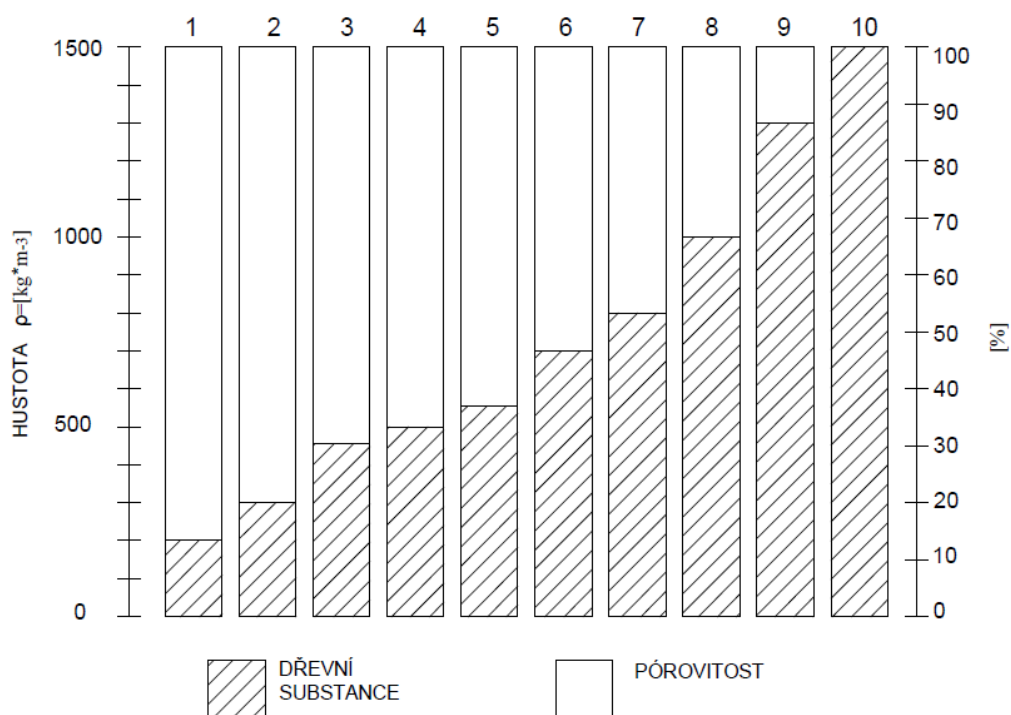
$$p = \frac{V_p}{V_0}$$

$p$  – pórovitost

$V_p$  – objem pórů

$V_0$  – objem suchého dřeva

Pórovitost dřeva poskytuje informace o vlastnostech jako je propustnost a difuze vody ve dřevě. Z technologického hlediska má velký význam pro impregnaci, sušení a povrchovou úpravu dřeva.



**Obr. 6 Podíl dřevní substance a pórů v závislosti na hustotě** ( 1- lehké dřevo, 2- jarní dřevo jehličnanů, 3- smrk, 4- olše, 5- modřín, 6- buk, 7- letní dřevo jehličnanů, 8- nejtěžší bělové dřevo, 9- nejtěžší jádrové dřevo, 10- dřevní substance), (Gandelová et al., 2009).

## 2.3 Sušení dřeva

### 2.3.1 Kontrola jakosti sušení

Jakostní znaky vysušeného řeziva je možné určit po jeho ochlazení. Pro základní hodnocení kvality se zjišťují tyto znaky:

- Odchylka průměrné konečné vlhkosti od požadované
- Kolísání konečné vlhkosti
- Vlhkostní spád
- Zkornatění

### **2.3.2 Klasické sušení s konvekčním ohřevem**

Při klasickém sušení teplým vzduchem o určité vlhkosti probíhá sušicí proces od povrchu ke středu a závisí na tepelné vodivosti materiálu. Přenos tepla a hmoty (vody) postupuje v protiproudu, což je rovněž nevýhodné. Rychlost sušení je v tomto případě limitována rychlostí difuze vody k povrchu. Vzhledem k tomu, že se jedná především o difuzi kapilární, je klasické sušení pomalé, zejména ke konci sušicího procesu. Vyšší teploty za účelem urychlení sušicího procesu mohou však způsobit deformace a snížit mechanickou odolnost. Vhodná je teplota do 60 °C, což je však pro sušení za atmosférického tlaku příliš pomalý proces.

### **2.3.3 Sušení s mikrovlnným ohřevem**

Při mikrovlnném sušení proces probíhá opačným směrem od středu k povrchu. Dochází tak ke vzniku tzv. „vnitřního tepla“ a tím ke vzniku tlakového gradientu, který účinně tlačí vodu k povrchu, odkud se rychle odvádí vzdušným prouděním. Přenos tepla a hmoty (vody) probíhá na rozdíl od teplovzdušného způsobu souběžně, což rovněž významně přispívá k urychlení sušicího procesu.

Úspěšně se ve světě využívá zejména při sušení textilu, kůže, bavlny, keramiky, tabáku, dřeva, léčiv. V České republice se mikrovlnná technika využívá hlavně při sušení dřeva.

Sušení lze vzhledem ke specifické interakci mikrovln s molekulami vody zkrátit až o jeden řád, tj. více než 10krát, a to i při teplotě pod 100 °C, tedy pod bodem varu vody.

#### **Výhody mikrovlnného sušení:**

- Vysoká sušicí rychlost oproti klasickým metodám sušení
- Rovnoměrnost vysoušení
- Zničení plísní, hub a dřevokazného hmyzu
- Energetické úspory vzhledem k působení mikrovln pouze na vlhkost

- Mezi největší výhody mikrovlnného ohřevu oproti ostatním sušícím způsobům patří jeho velmi dobrá regulace. Ta může probíhat v celém objemu rovnoměrně (Romill,2005)

#### **Nevýhody mikrovlnného sušení**

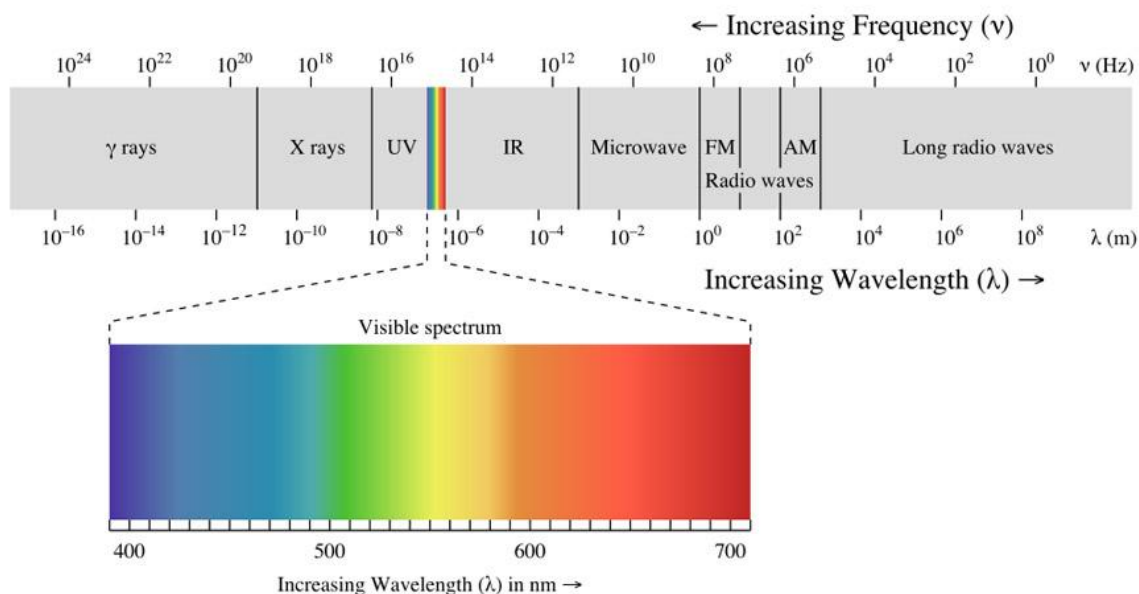
- Vznik tzv. „hot spots“, horkých lokálních míst způsobujících místní přehřátí
  - Rozžhavení kovových částí
  - Vyšší investiční náklady na mikrovlnné sušicí zařízení
- (<http://svetvedy.cz>)

## **2.4 Mikrovlnné záření**

Mikrovlny jsou formou elektromagnetického záření v rozmezí od jednoho metru – 300 MHz, až jeden milimetr – 300 GHz. Různé zdroje definují různé rozsahy frekvencí mikrovln. Do tohoto rozsahu spadají UHF a EHF (Ultra High Frequency a Extremely High Frequency) pásma (rozsah milimetrových vln). Předpona mikro napovídá o velikosti vln ve srovnání s vlnou v typickém rozhlasovém vysílání, která má kratší vlnovou délku.

Mikrovlny se pohybují rovně. Na rozdíl od nižších radiových vln s menším kmitočtem se neohýbají, ale kopírují povrch, nebo se odrážejí do ionosféry.

Mikrovlny mají širokou škálu uplatnění. Používají se jako komunikační linky, bezdrátové sítě, radary, satelitní a vesmírná komunikace, v lékařství, dálkový průzkum země, ohřev potravin a právě i na vysoušení různých materiálů včetně dřeva (<https://www2.electron.frba.utn.edu.ar>).



Obr. 7 Elektromagnetické spektrum (<http://ceskatelevize.cz>).

### 2.4.1 Výzkum MW

Pomocí mikrovln mohou být upravovány vlastnosti dřeva, mimo to lze mikrovlny použít i na jeho samotné vysoušení. Tyto mikrovlnné úpravy vlastností jsou v poslední době velmi zkoumány. (Dedic, Zlatanovic 2001; Hansson, Antti 2003; Hunt et al. 2005; Zielonka, Gierlik 1999). Sušení dřeva mikrovlnným zářením lze nakombinovat i s jinou metodou sušení, např. vakuovým, sublimačním apod. (Mollekopf, Wagenführ 2002; Seyfarth et al. 2003; Leiker, Adamska 2004). Tímto principem sušení je uvolňováno růstové napětí (Vinden et al. 2011).

První pokusy mikrovlnného sušení dřeva začaly v polovině 20. století. (Egner 1964, Resch 1968). Prvotní problémy byly s nehomogenitou pole a s nemožností měřit parametry. Proto byly posléze vyvinuty kontinuální mikrovlnné zařízení. (Antti 1999, Hansson a Antti 2003, Leiker et al. 2004ab a Prasad 2012). Egner (1964) použil pro vysoušení prken buku kontinuální mikrovlnný tunel s frekvencí 2450 MHz a výkonem 6 kW. Došel k závěru, že tento typ sušení nemá žádný vliv na úpravu hygroskopicity dřeva. Další prototyp mikrovlnné sušárny pro vysoušení o frekvenci 915 MHz a výkonu 25 kW vyvinul Barnes (1976). Dosáhl vyššího průniku

mikrovlň, což znamenalo kratší dobu sušení a minimální změny mechanických vlastností. Anti et al. (1999) se zabývala rozložením teploty a vlhkosti v materiálu během sušícího procesu. Zjistil, že oproti konvenčnímu sušení je vyšší teplota blíže k povrchu a vlhkostní spád je opačný.

### **2.4.2 Mikrovlnná technologie**

Tato převratná technologie byla objevena počátkem 40. let 20. století v Anglii, konkrétně na univerzitě v Birminghamu. Mikrovlnná technologie nachází své první uplatnění v bitvě o Británii během druhé světové války ve formě radaru.

S dalším objevem přišla americká firma vyrábějící radary a to na základě postřehu, že se v blízkosti radaru rozehrála čokoláda. Toto dalo podnět k sestrojení mikrovlnné trouby (Hájek, 2003).

Mikrovlny jsou tzv. neionizující záření. Mají schopnost elektrony v atomech pouze rozkmitat, ne však je vytrhnout přičemž by došlo v látce k chemické změně. Díky této vlastnosti je působení mikrovln neškodné.

Mikrovlny mohou být pohlcené v dané látce, nebo odražené. Pohlcené mikrovlny rozkmitají molekuly vody, tuků nebo cukrů. Na tomto principu jsou založeny mikrovlnné trouby za účelem ohřívání látky. Odrážejí se od kovových materiálů, čehož využívají civilní i vojenské radary (Kundracik, 2005).

Mikrovlny jsou vytvářeny pomocí tzv. magnetronu, to je vysokonapěťová elektronka. Uvnitř vakuované trubice se nachází kovový váleček, sloužící jako katoda, obklopený kovovým blokem (anodou). Od anody vede trubice sloužící jako anténa. K trubici jsou potom zvenku připevněna hliníková chladicí žebra a celá trubice je vložena mezi dva magnety. Katoda je zahřívána elektrickým proudem a proto se z ní uvolňují elektrony. Magnety vytvářejí v trubici magnetické pole a ovlivňují tak pohyb elektronů.

Jednotlivé komory anodového bloku se chovají jako oscilační obvody. Štěrbina mezi okraji komory má funkci kondenzátoru, vodivý zbytek komory má funkci cívky.

Elektrony nabíjí jeden okraj komory, takže začne okamžitě procházet proud cívkou na druhý okraj. Průchod proudu vytvoří magnetické pole, které indukuje opačný proud komorou. V komorách tak vzniká stejně jako v oscilačním obvodu střídavý proud vysoké frekvence, který vyvolává elektromagnetické vlnění vysílané anténou do prostoru trouby (<http://fyzweb.cuni.cz>).

Mikrovlny jsou vyzařovány do prostoru, který je ohraničený kovovým pláštěm, od kterého se odrážejí. Zde se vytváří časově proměnné prostorové pole, které se deformuje po vložení materiálu v závislosti na jeho objemu, fyzikálních vlastnostech a samotné struktuře materiálu a také na výkonu a frekvenci mikrovln.

Dřevo, potraviny nebo organismy s volnou vodou jsou schopny pohltnout danou energii mikrovln a v důsledku toho zvýšit teplotu. Tento jev je označován jako frikce. Molekuly vody, které jsou elektricky neutrální, mají bipolární charakter (Baničová, 2016).

Při mikrovlnném záření se polarita v mikrovlnném poli mění více než 2,45 miliardkrát za vteřinu. Mění se polarita nutí molekulu vody k přizpůsobení se těmto změnám. Molekula je tedy neustále nucena měnit svoji orientaci, čímž dochází k vibraci nebo až k rotaci celé molekuly. Tímto vynuceným pohybem vzniká tření mezi molekulami vody (Nasswetrová, 2008).

Při mikrovlnném ohřevu je tedy energie dodávána do části dřeva s největší vlhkostí, což je střed materiálu. Zde dochází k tření molekul vody, což zapříčiní vznik tepelné energie a změnu skupenství vody volné na skupenství plynné (Baničová, 2016)

Vzniklá vodní pára vytváří tlak, pomocí kterého vytlačuje vlhkost pryč ze dřeva (Nasswetrová, 2008).

Na rozdíl od klasického ohřevu je u mikrovln nejvyšší teplota uvnitř materiálu a směrem k povrchu lineárně klesá (Hájek, 2003).

Tento jev probíhá pouze u homogenních materiálů. U vícesložkových materiálů dochází k ohřevu pouze u materiálu, který pohlcuje mikrovlnné záření. V důsledku nehomogenosti materiálu vznikají horká místa tzv. hot spots. Díky schopnosti ohřívát pouze polární látky je ohříván materiál vložený do mikrovlnného pole, nikoli okolní prostředí materiálu (Hájek, 2003).

#### **Šíření mikrovlnného záření materiálem probíhá jedním ze tří způsobů:**

- Prochází – nepolární látky
- Odraz - kovy
- Pohlcení – polární látky

Sušení dřeva se řídí pomocí dvou mechanismů – přenosem hmoty a přenosem tepla. Jak už bylo zmíněno, při mikrovlnném ohřevu je ohříván nejvíce střed a vlhkost je vytěšňována směrem ven. Díky tomuto jevu nedochází k vysoušení nejdříve povrchu jako u jiných stylů sušení a je tím eliminován vznik povrchových trhlin.

U jiných typů sušení dochází právě k vysoušení povrchu materiálu a poté až středu. Díky tomu dochází ke vzniku povrchových trhlin. Na povrchu vznikne vysušená vrstva, která přeruší kapilární tok vlhkosti ze středu. Kvůli přerušnému toku vlhkosti nedochází ke zvlhčování vysoušeného materiálu, který by právě vzniku trhlin zabránil (Nasswetrová, 2008).

#### **2.4.3 Polarizace látek obsažených ve dřevě**

Polarizace látek obsažených ve dřevě je vyvolána silovým působením elektrického pole na vázané náboje v látce. Každý atom obsahuje minimálně jeden kladný a záporný náboj, proto se polarizace musí objevit vždy, je-li přítomno elektrické pole.

Molekula vody je tvořena dvěma atomy vodíku a jedním atomem kyslíku. Voda má nesymetricky rozmístěný elektrický náboj. Záporný náboj je blíž k atomu kyslíku a kladný je blíž k atomům vodíku. Jejich směr je ale chaotický a při polarizaci dojde pouze k uspořádání dipólů do jednoho směru. Působením silného elektromagnetického



pole se začnou molekuly natáčet dle okamžitého směru elektromagnetického pole a takto mění svoji orientaci až několik miliardkrát za sekundu. Přitom na sebe vzájemně naráží a jejich energie se třením mění na teplo.

## **2.5 Vliv mikrovlnného sušení na dřevo**

### **2.5.1 Barevné změny**

Barevnými změnami při mikrovlnném sušení dřeva se roku 1999 zabývala Antti. Porovnávala mikrovlnně a konvenčně vysušené dřevo. U konvenčního sušení je barevná změna běžná z důvodu nerovnoměrného vysychání a různých teplot během sušení (Stenudd, 2003). Podle Antti (1999) je při mikrovlnném sušení barevná změna mnohem menší. Toto vysoušení je tedy vhodné pro materiál s vysokou požadovanou kvalitou. Zásadní vliv na barevnou změnu dřeva během mikrovlnného sušení má kyslík (Sandoval-Torres et al. 2010).

### **2.5.2 Anatomická stavba**

Zhang et al. (2013) zkoumal změnu mikroskopické změny modřínu pomocí mikrovlnného záření. Zjistil, že se díky mikrovlnnému záření protrhaly dvojtečky tracheid, což vedlo k uvolnění vodivých cest a tím pádem k zrychlení procesu sušení. Nasswet-trová a Nikl (2011) zkoumali změny dřeva buku v závislosti na mikrovlnách. Udávají, že dřevo neprokázalo žádné změny anatomických elementů. Podle XiMinga et al. (2002) došlo u dřeva jasanu k roztržení ztenčenin buněčných stěn a k přemístění thyl v cévách. Výzkum Vongpradubchai a Rattanadecho (2009) uvádí, že mikroskopická stavba u konvenčního a mikrovlnného sušení je velmi podobná. Mikrovlnné však uvádějí jako kvalitnější vysoušení z hlediska menšího sesychání.

### **2.5.3 Změna hustoty**

Změnu hustoty u dřeva zapříčiňuje tvorba vnitřních trhlin a v důsledku toho zvětšení objemu. Podle Brodieho (2008) se hustota u dřeva topolu snížila o 9 %. Torgovnikov a Vinden (2009) došli ke stejnému závěru jako Brodie, a to, že hustota díky mikrovlnám ubývá. Podle Torgovnikova a Vindena závisí snížení hustoty hlavně

na druhu materiálu a na použitém výkonu mikrovlnné sušárny. Zjistili, že mikrotrhliny vznikají při nízkém výkonu a naopak makrotrhliny při vysokém.

#### **2.5.4 Mechanické vlastnosti**

Autoři zabývající se touto problematikou uvádějí, že se mechanické vlastnosti snižují s rostoucím výkonem mikrovlnné úpravy. Oloyede a Groombridge (2000) udávají až 60 % pokles pevnosti dřeva borovice karibské při výkonu 1,6 kW. Podle Leikera et al. (2005) nedošlo k významným rozdílům v pevnosti u dřeva buku sušeného kombinací mikrovlnného ohřevu s vakuem a konvenčním sušením.

## **2.6 Další využití mikrovln**

### **2.6.1 Mikrovlnná technologie pro sanaci dřeva**

Mikrovlnná energie se začala před lety používat k hubení termitů v USA. Vzhledem k vysoké účinnosti a relativně malé finanční náročnosti našla tato technologie své uplatnění i u nás. Jejím principem je zahřívání a pohyb molekul vody obsažených ve dřevě a výrobcích ze dřeva, nebo v živých organismech (škůdcích), působením silného pole vysokofrekvenční mikrovlnné energie.

Voda, která není vázána v buněčných strukturách, je z větší části vytlačována ven ze dřeva ve směru působení mikrovlnné energie a z vnější části vypařována jako při konvenčním vysoušení. Pokud je dřevo napadeno larvami dřevokazného hmyzu, jsou zahubeny následkem přehřátí jejich buněčné vody a změnou stavu tělních bílkovin (<http://sanace-dreva.cz/>).

### **2.6.2 Mikrovlnné sušení knih**

Vysoušení knih ze zaplavených knihoven pomocí mikrovln je nejvhodnější a nejšetnější způsob. Knihy byly po záplavách očištěny vodou a zamrazeny. Vysoušení pomocí mikrovln je výhodné nejen z hlediska samotného vysoušení, ale i pro schopnost mikrovln zahubit plísň.

Zahájení projektu mikrovlnného sušení bylo založeno na dosavadních zkušenostech Mikrovlnné laboratoře ÚCHP získaných od roku 1992. Získané výsledky posloužily jako teoretický základ využití pro sušení papírových materiálů. Díky interakci mikrovln s molekulami vody lze zkrátit sušicí dobu více než 10krát, a to i při nižší teplotě, než je bod varu vody. Projekt byl konzultován se specialisty na mikrovlnné sušení včetně výrobců různých sušících zařízení v zahraničí (Německo, Velká Británie, Francie, USA, Austrálie aj.).

Technologie mikrovlnného sušení archiválií nebyla dosud ve světě zavedena. Důvodem byly problémy a úskalí související s těžko kontrolovatelnými interakcemi mikrovln s různorodými složkami vysoušených papírových materiálů. Bylo třeba zjistit všechny možné problémy mikrovlnného sušení a nalézt způsob, jak je odstranit, aby mikrovlnná metoda sušení mohla být zcela bezpečná.

### 3 Materiál a metodika

Pro zkoumání vlhkostního spádu a zbytkového napětí ve dřevě po průchodu zkušebního tělíška kontinuálním mikrovlnným zařízením bylo zvoleno dřevo buku (*Fagus Sylvatica L.*). Bukové dřevo pochází ze školního lesního podniku Masarykův les – Křtiny. Příprava vzorečků a samotné měření probíhalo v laboratořích Mendelovy univerzity v Útěchově u Brna.

Vzorky byly vyřezány z prken z jednoho výřezu buku. To zajistí stejné vlastnosti dřeva například vzhledem k růstovým nebo klimatickým podmínkám.

Jelikož je velmi důležitým faktorem při sušení dřeva orientace anatomických elementů vůči ose středu, bylo nutné rozlišit radiální a tangenciální výřezy vzorků. Dokonale radiální vzorek prochází prostředkem kmene a má letokruhy orientované kolmo na svou šířku. Dokonale tangenciální vzorek pochází z kraje kmene a jeho letokruhy jsou spíše rovnoběžné vzhledem k šířce samotného vzorku. Tímto je do jisté míry ovlivněn pohyb vody ve dřevě, tedy i samotné sušení.

Metodika pracovních postupů, je rozdělena na pět procesních fází. První fáze je vlastní výroba zkušebních vzorků, které budou sušené pomocí kontinuálního mikrovlnného zařízení. V druhé fázi je nastavena frekvence mikrovln a rychlost posuvu pásu mikrovlnné sušárny. Třetí fáze obsahuje samotné průjezdy jednotlivých vzorků mikrovlnným zařízením. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin po deseti vzorcích (s radiální a tangenciální orientací) z důvodu rychlejšího vysušení jednotlivých vzorků a zabránění vychladnutí vzorku v pauze po průjezdu. Každý jednotlivý vzorek byl vážen při vjezdu i po výjezdu z mikrovlnné sušárny. Ve čtvrté fázi je z každého vzorku odebráno devět malých vzorečků a to tři z každého kraje a tři ze středu vzorku. Vzorečky jsou následně popsány. Každá tato trojice vzorečků ze stejné části téhož vzorku je rozřezána na zjištění vlhkostního spádu, vidličkovou zkoušku a zkoušku středovým řezem pro zjištění zbytkového napětí během sušení. Pátá fáze je měření a samotné vyhodnocení jednotlivých zkoušek.

### 3.1 Výroba zkušebních vzorků

Mezi první operace pro přípravu vzorků patřilo vybrání vhodných bukových prken v areálu univerzity v Útěchově. Po vybrání vhodného materiálu byla prkna rozřezána na formátovací pile na hranolky o šířce 10 cm. Následně byly vymanipulovány vady (suky, trhliny, nepravé jádro apod.) a pásy materiálu nakráčeny na délku 50 cm. Výsledné rozměry vzorků tedy byly  $50 \times 10 \times 2,5$  cm ( $l \times š \times v$ ). Vzorky byly rozděleny na deset vzorků s radiálním řezem a na deset s tangenciálním. Vzorky byly označeny čísly od jedné do dvaceti. První desítkou byly označeny vzorky s radiální orientací a druhou desítkou vzorky s tangenciální orientací.

Zároveň se vyřezal vzorek ze zbylých odřezků, opět bez vad, který sloužil na zjištění počáteční vlhkosti. Na vysušení těchto vzorků byla použita horkovzdušná sušárna Sanyo.

### 3.2 Parametry mikrovlnné sušárny a sušení vzorků

Na mikrovlnné lince byl nastaven výkon 1,5 kW, frekvence mikrovln 2,45 MHz a posuv pásového dopravníku  $0,2 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ . Důležité bylo zmenšení otvoru na průjezd sušícího tělesa, z důvodu přebytečného úniku mikrovln. Toto odstínění bylo provedeno pomocí hliníkové fólie. Po nastavení požadovaných parametrů sušárny byl zapnut odvod par z komory. Na ochranu proti unikajícímu mikrovlnnému záření byly použity olověné zástěry a na ochranu proti hluku byly použity klapky na uši.

Nyní mohl nastat vlastní průběh sušení. První skupina deseti vzorků s radiální orientací byla připravena na průjezd sušárnou. Každý vzorek byl před vstupem i následně po výstupu zvážen laboratorní váhou Nagata a pomocí infračerveného laserového teploměru Würth změřena jeho teplota. Po průjezdu posledního vzorečku byl proces opakován, dokud nebyl hmotnostní rozdíl mezi vstupem a výstupem jen s nepatrným rozdílem. Následovaly průjezdy sušárnou dalších deseti tangenciálních vzorků o stejném průběhu jako předchozí skupina.

### 3.3 Příprava vzorečků

Následovalo rozřezání vzorků na jednotlivé zkoušky. Z každého vzorku bylo vyřezáno devět menších vzorečků. Tři z prostředka a tři z každého kraje. Vzorečky byly popsány X/Y přičemž X bylo číslo vzorku a Y místo, odkud byl vzoreček ze vzorku vyříznut. Takto očíslované byly vždy tři vzorky, přičemž první byl využit na vlhkostní spád, druhý na vidličkovou zkoušku a třetí na zkoušku středovým řezem.

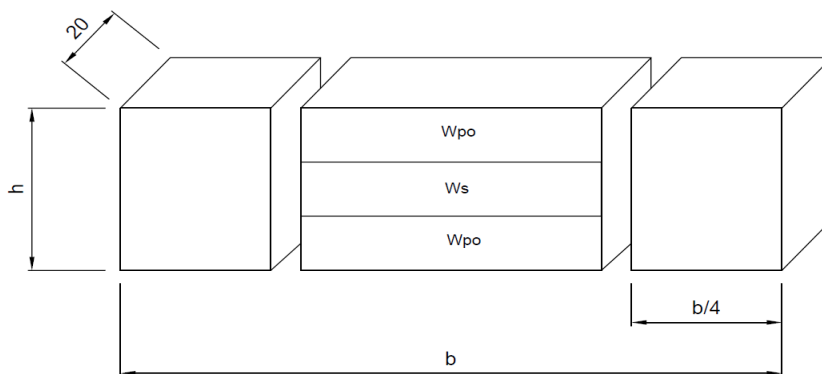
Vzoreček na vlhkostní spád byl následně zbaven svých okrajových částí a podélně rozřezán podle normy na další tři vzorečky s označením X/Y/Z.

Pomocí pásové pily a příložníku byly podélně rozřezány vzorky na zkoušku středovým řezem. Vidličková zkouška byla opět nařezána na pásové pile a za pomoci dlátka odstraněn přebytečný materiál.

### 3.4 Jakostní zkoušky

- Vlhkostní spád
- Zkornatění
  - Vidličková zkouška
  - Zkouška středovým řezem

**Vlhkostní spád** je rozdíl vlhkostí dvou oblastí v jednom materiálu, většinou rozdíl mezi středem a povrchem. Zjistí se z rozdílu vlhkosti středové a průměrných hodnot obou povrchových vrstev. Před rozřezáním vzorku je odstraněna okrajová část v šířce  $b/4$ . Rozřezané vzorky jsou zváženy laboratorní vahou Mettler Toledo, vysušeny v horkovzdušné sušárně na nulovou vlhkost a opět zváženy laboratorní vahou.

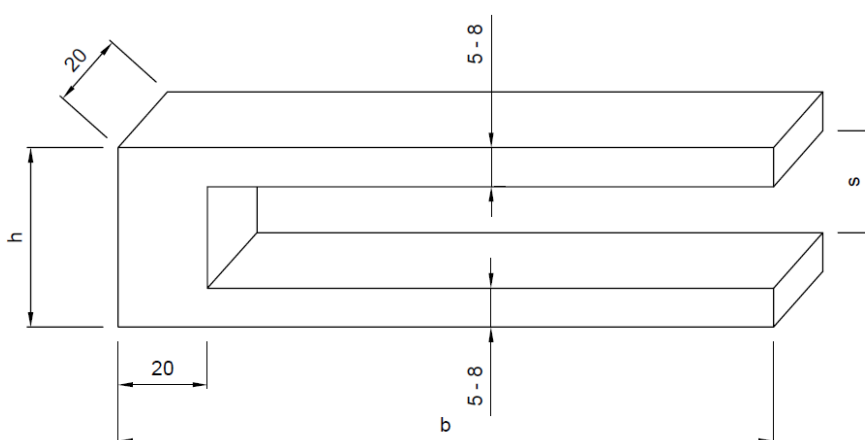


Obr. 8 Vlhkostní spád pro řezivo do 50 mm (ČSN 49 0651, 1989).

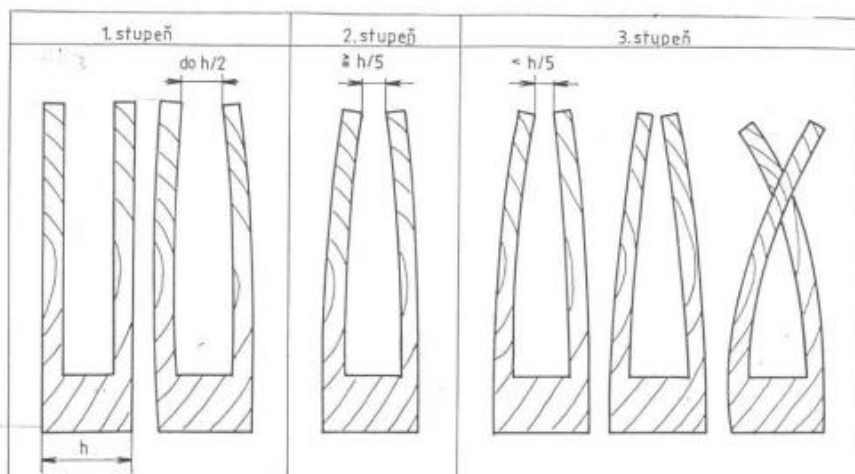
**Zkornatění** je trvalá deformace dřeva. Vzniká v průběhu sušení materiálu pod mezí hygroscopicity při překročení hranice pružné deformace. Pro zjištění tohoto jakostního znaku slouží dvě zkoušky. Zkouška středovým řezem a vidličková zkouška, která se již nepoužívá. Zbytkové napětí bylo měřeno posuvným měřítkem Mitutoy.

Vidličková zkouška se v současnosti nepoužívá, slouží spíš jen orientačně. Provádí se výpočtem ze vzorce:

$$K = \frac{(h - s) \times 100}{h \times b} \times 100 (\%)$$

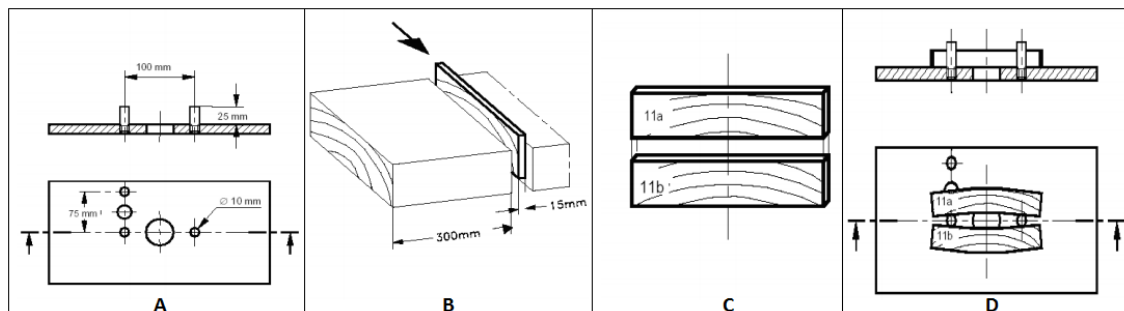


**Obr. 9** Vzorek pro vidličkovou zkoušku (ČSN 49 0651, 1989).



**Obr. 10** Vyhodnocení vidličkové zkoušky (ČSN 49 0651, 1989).

### Zkouška středovým řezem



**Obr. 11** postup přípravy vzorků a vyhodnocení při zkoušce zkornatění středovým řezem - 1 - zkušební přípravek, 2 - výběr vzorku z řeziva, 3 - rozřezání vzorku, 4 - měření vysušeného vzorku pomocí přípravku na zkornatění (ČSN 49 0646, 2003).

### Stupeň jakosti vysušeného řeziva

**Tab. 1** Zařazení vysušeného řeziva do jakostní třídy a následné určení vhodnosti použití materiálu (Dejmal, 1995; ON 49 0651).

jakostní znak	stupeň jakosti		
	1	2	3
odchylka konečné a požadované vlhkosti	do 0,5 %	0,6 - 1,5 %	nad 1,6 %
kolísání konečné vlhkosti	do 2 %	2,1 - 5 %	nad 5,1 %
Vlhkostní spád			
do 28 mm	do 1,0 %	1,1 - 2,0 %	nad 2,1 %
29-50 mm	do 1,5 %	1,6 - 3,0 %	nad 3,1 %
nad 51 mm	do 2,5 %	2,1 - 4,0 %	nad 4,1 %
zkornatění	do $h/2$	do $h/5$	nehodnotí se
vhodnost na výrobky	modely, hudební nástroje, sport, pažby	nábytek, obklady, podlahy, lepené vazníky, sudy, podlahy nákladních aut a vlaků	obaly, palety, řezivo pro stavebnictví





Obr. 12 Zkouška zbytkového napětí vidličkovou zkouškou - znehodnocený vzorek podél dřevěného paprsku.



Obr. 13 Vzorečky na zkoušku vlhkostního spádu a zkoušky zkornatění.

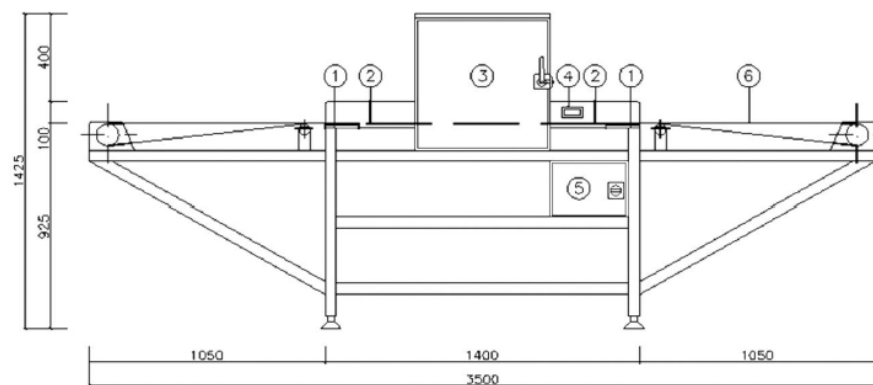


Obr. 14 Zkouška zkornatění - vzorky vidličkové zkoušky.

## 3.5 Technický popis použitého zařízení

### 3.5.1 Kontinuální mikrovlnná linka

Mikrovlnná kontinuální linka v laboratořích Mendelovy univerzity v Útěchově u Brna, byla vyrobena ve spolupráci s firmou Romill, která se zabývá mimo jiné právě i výrobou mikrovlnných linek. Linka může být používána jako sušárna, nebo k modifikaci dřeva.



**Obr. 15 Schéma mikrovlnné kontinuální sušárny** - 1 - keramická tlumivka, 2 - měděné stínění, 3 - mikrovlnná komora, 4 - ovládání dopravníku, 5 - hlavní spínač dopravníku, 6 - pás dopravníku.

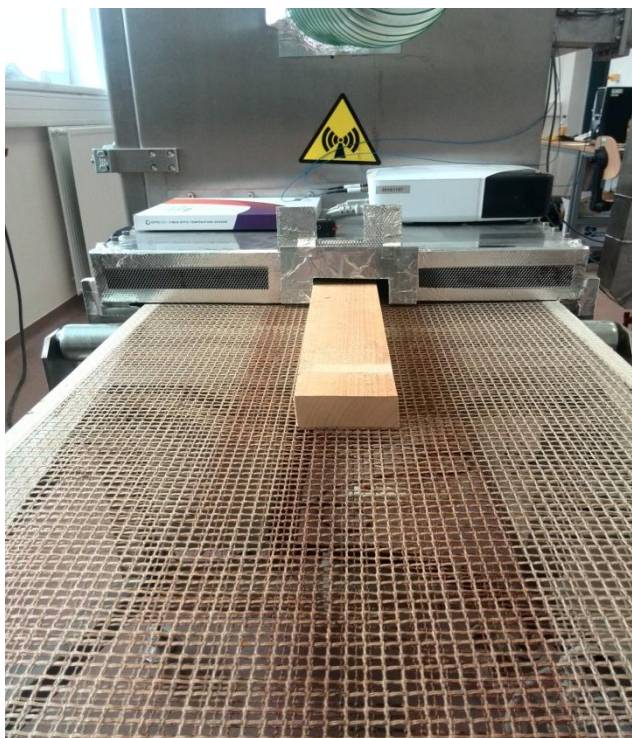


**Obr. 16 Mikrovlnná linka v laboratořích Mendelovy univerzity v Útěchově u Brna.** Na obrázku je vidět pásový dopravník se stíněním, komora, odtah přebytečných mikrovln a mikrovlnný generátor s řídicí jednotkou.

### Pásový dopravník a stínění

Pásový dopravník slouží k posunu vzorku skrz mikrovlnné pole. Délka tohoto pásu před a za komorou je 1 m a šířka pásu je 0,45 m. Pás dopravníku je vyrobený ze sklo-laminátu, který nereaguje s mikrovlnami. Pomocí frekvenčního měniče lze regulovat rychlost pásu v závislosti na specifikaci úpravy dřeva.

Stínění mikrovlnné linky zabraňuje unikání mikrovlnných vln mimo linku. Na obr. č. 9 je vidět přidělané alobalové stínění, přesně na šířku vzorku.



**Obr. 17** Pásový dopravník se vzorkem buku a s hliníkovým stíněním pro minimální únik mikrovln.

### Mikrovlnný generátor s řídicí jednotkou

Mikrovlnný generátor může pracovat v rozmezí výkonu 0,6 – 5 kW. Nahoře na generátoru je umístěna řídicí jednotka, pomocí které lze ovládat celé zařízení.

Od mikrovlnného generátoru jsou mikrovlny vedeny potrubím z nerezové oceli. Těsně před vstupem mikrovln do linky je umístěno zařízení na úpravu geometrie vlny. To slouží k maximální absorpci mikrovln materiálem za pomoci manuálního posuvu záření elektromagnetické vlny.



**Obr. 18** Mikrovlnný generátor s řídicí jednotkou.



**Obr. 19** Zařízení na úpravu geometrie mikrovlny.



### 3.5.2 Horkovzdušná sušárna SANYO (konvenční ohřev)



Obr. 20 Horkovzdušná sušárna SANYO.

### 3.5.3 Digitální posuvné měřítko MITUTOYO



Obr. 21 Digitální posuvné měřítko MITUTOYO.

### 3.5.4 Laboratorní váha METTLER TOLEDO



Obr. 22 Laboratorní váha METTLER TOLEDO.

### 3.5.5 Laboratorní váha Nagata FATH-12



Obr. 23 Laboratorní váha Nagata FATH-12 s bukovým vzorkem.

### 3.5.6 Würth infračervený laserový teploměr

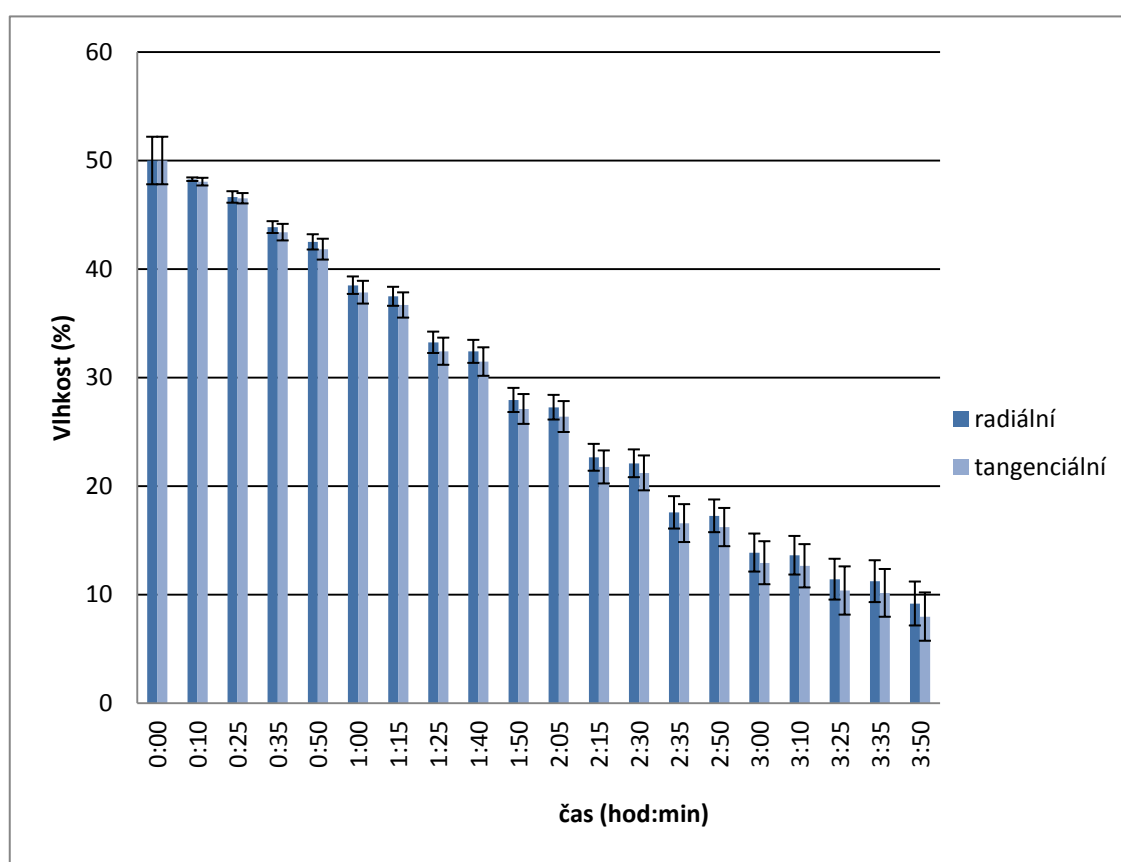


Obr. 24 Würth infračervený laserový teploměr.

## 4 Výsledky

### 4.1 Změna vlhkosti po průchodu MW

Z obr. 25 je patrné, že vlhkost klesla během 230 minut z 50 % na průměrných 9,18 % u vzorků s radiální orientací vláken a na průměrných 7,97 % u vzorků s tangenciální orientací vláken. Z grafu je patrné, že všechny průměrné hodnoty tangenciálních vzorků vysychaly během průchodu mikrovlnným zařízením lépe než vzorky radiální.



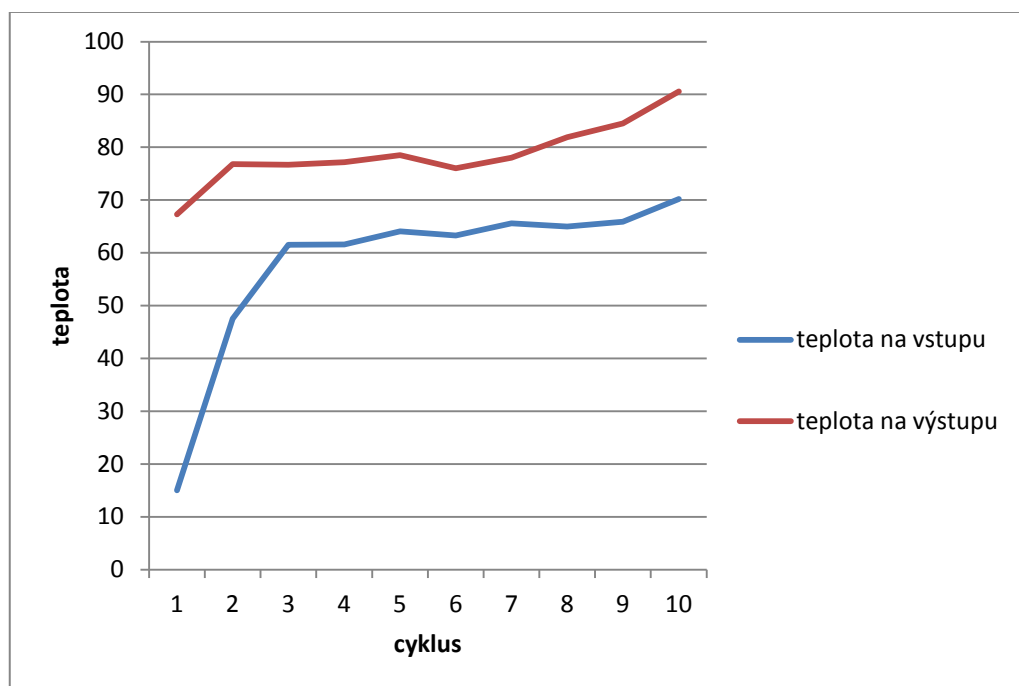
Obr. 25 Vlhkostní spád, graf vyjadřuje snižování vlhkosti během průjezdu kontinuálním mikrovlnným zařízením v závislosti na čase. Radiální vzorky znázorňuje tmavě modrý sloupec, tangenciální vzorky světle modrý.

Směrodatná odchylka u radiálních vzorků začínala na hodnotě 0,16 u prvního vzorku a postupně rostla až po hodnotu 2,02. To znamená, že rozdíl v naměřených



hodnotách byl s každým následujícím cyklem větší. Počáteční směrodatná odchylka u tangenciálních vzorků byla o něco vyšší, začínala na hodnotě 0,35 a postupně rostla do hodnoty 2,23.

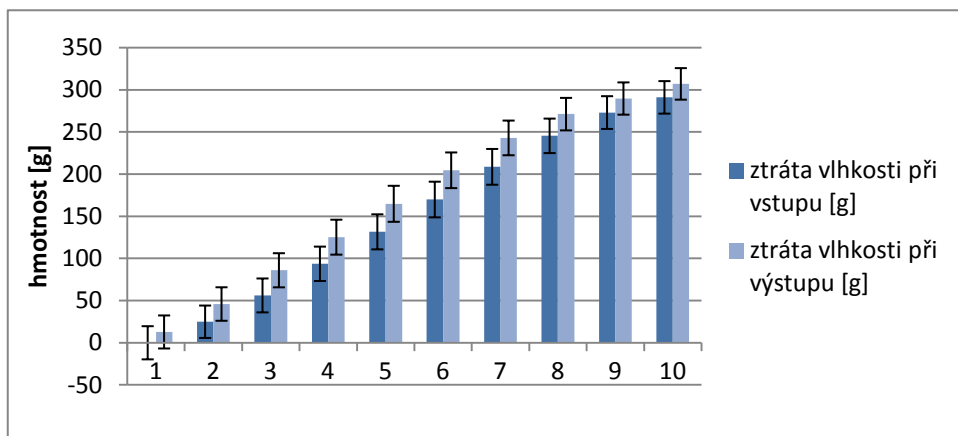
## 4.2 Změna teploty po průchodu MW



Obr. 26 Teplota vzorku před vstupem a po výstupu z MW sušárny.

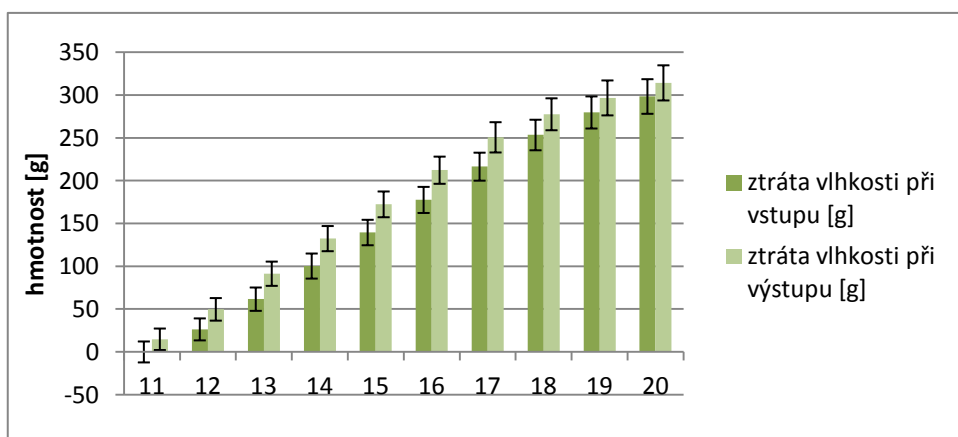
Teplota připravených vzorků na sušení byla při prvním vstupu 15 °C a po výstupu z kontinuální mikrovlnné linky 67,3 °C. Teploty se před vstupem do linky pohybovaly převážně v rozmezí 60-70°C a teploty po výstupu v rozmezí 70-80 °C. Výsledné teploty desátého cyklu byly před vstupem 70,2 °C a po výstupu 90,6 °C. Rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem byl průměrně 20,78 °C.

### 4.3 Ztráta vlhkosti během průchodu MW



Obr. 27 Ztráta vlhkosti vyjádřená v gramech v radiálním směru vláken.

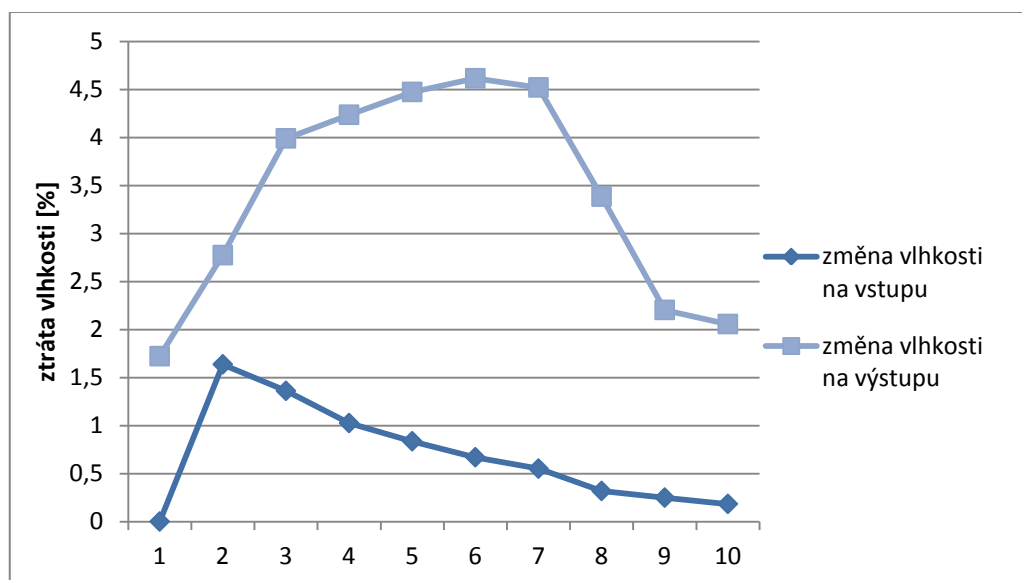
Graf 27 znázorňuje ztrátu vlhkosti jednotlivých cyklů vzhledem k počátku sušení vzorků s radiální orientací vláken. Průměrná ztráta vlhkosti narůstala až do posledního cyklu, kde došlo k celkové ztrátě 307,12 gramů vody. Průměrná ztráta vlhkosti vzorků, v době mimo sušárnu byla 5,68 gramů v každém cyklu, tedy 51,1 gramů vody celkem. Průměrná ztráta ztráty vlhkosti v sušárně byla 25,6 gramů na jeden cyklus, tedy 256 gramů vody odpařené během sušení.



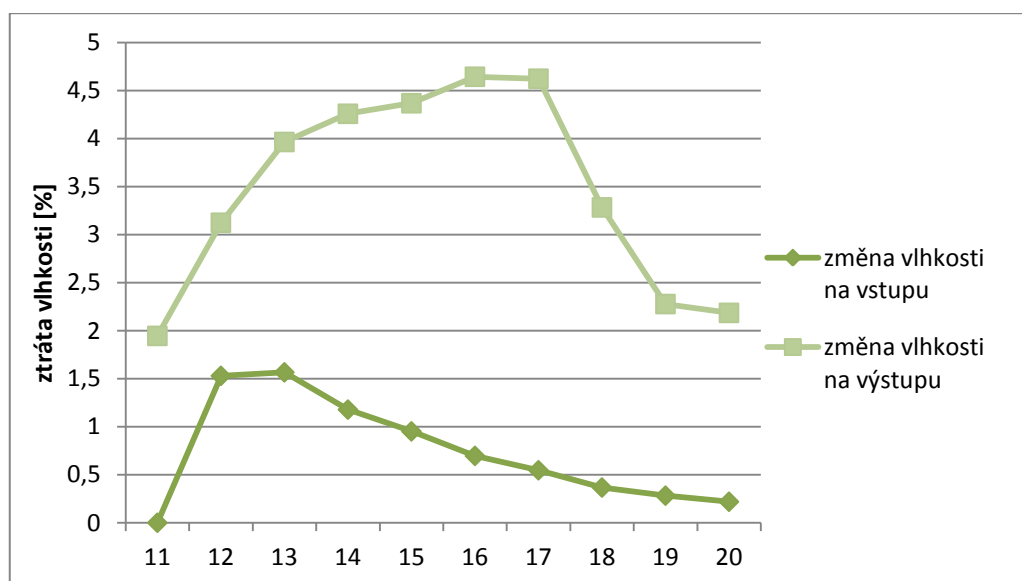
Obr. 28 Ztráta vlhkosti vyjádřená v gramech v tangenciálním směru vláken.

Průměrná ztráta vlhkosti u vzorků s tangenciální orientací vláken měla hodnotu 314,38 gramů. Z toho bylo odpařeno průměrně 6,15 gramů vody mimo sušárnu, celkem tedy 55,36 gramů a během průchodu sušárnou bylo průměrně odpařeno během každého cyklu 25,9 gramů vlhkosti, celkem tedy 259 gramů.

#### 4.4 Změna ztráty vlhkosti v závislosti na snižování vlhkosti dřeva



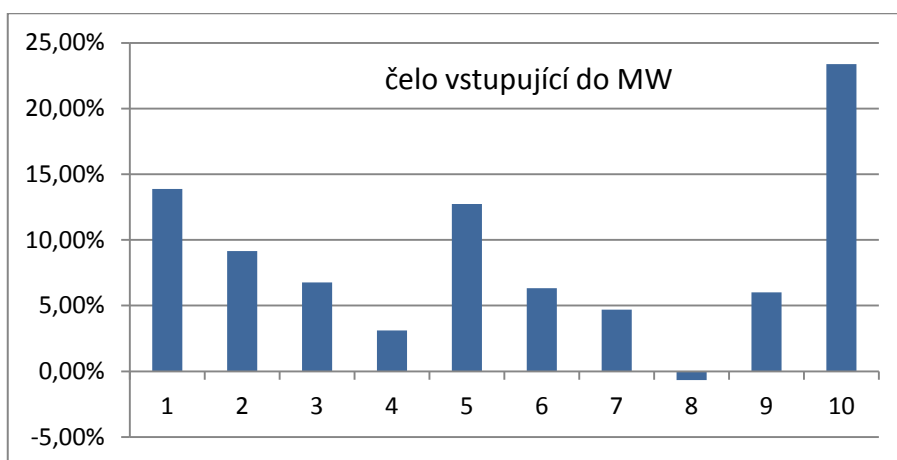
Obr. 29 Změna vlhkosti při vysoušení vzorků u vzorků s radiální orientací vláken.



Obr. 30 Změna vlhkosti při vysoušení vzorků u vzorků s tangenciální orientací vláken.

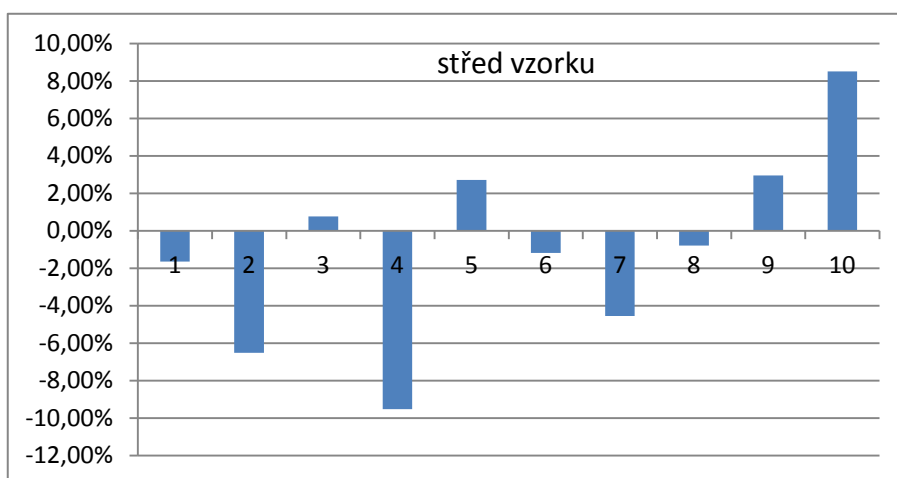
Z grafů je patrné, že do šestého cyklu se u radiálních i tangenciálních vzorků procentuelní ztráta vlhkosti navyšovala. Od šestého cyklu se však kvůli sníženému obsahu vody ve dřevě začala i snižovat procentuelní ztráta odpařované vody. U radiálních vzorků je to vlhkost 22,7 % a u tangenciálních vzorků 21,8 %.

## 4.5 Vlhkostní spád



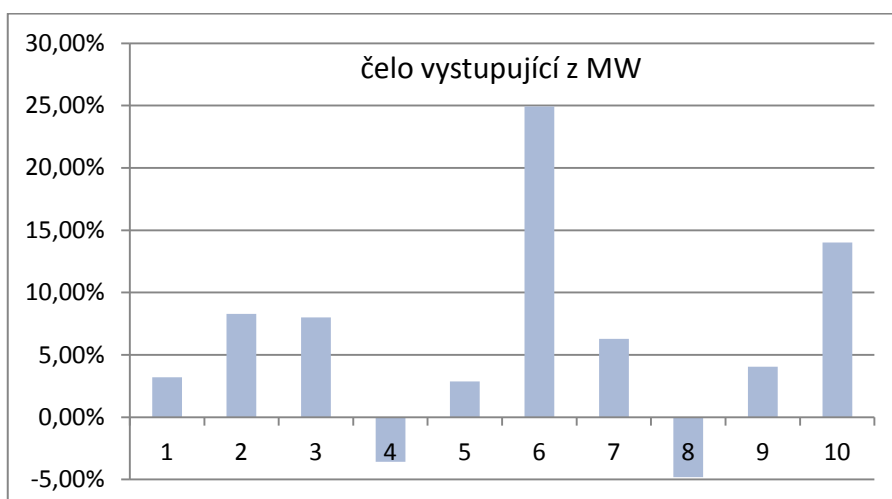
**Obr. 31** Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na vstupním čele vzorku.

Průměrný vlhkostní spád radiálních vzorků, hodnocený na čele vstupujícím (přední čelo) do MW linky je 8,5 %. Nejvyššího vlhkostního spádu dosáhl vzorek č. 10 s hodnotou 23,9 % a naopak nejnižší hodnotu měl vzorek č. 8 s hodnotou -0,68 %.



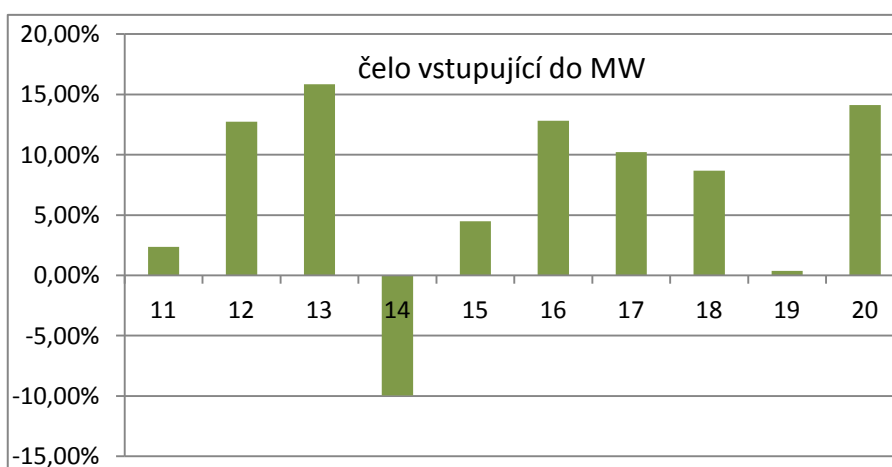
**Obr. 32** Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na středu vzorku.

Průměrný vlhkostní spád radiálních vzorků, hodnocený na středu vzorku je -0,9 %. Záporné hodnoty znamenají vyšší vlhkost prostřední části vzorku pro určení vlhkostního spádu oproti vlhkostem krajovým. Nejvyšší vlhkostní spád měl vzorek č. 10 (8,5 %). Nejmenší pak u vzorečku č. 4 s hodnotou -9,53 %.



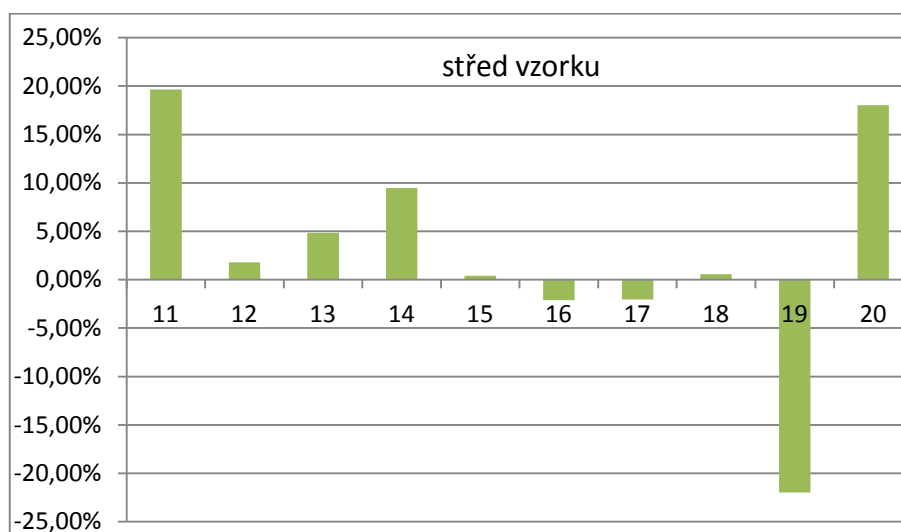
**Obr. 33** Vlhkostní spád vzorků s radiální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na výstupním čele vzorku.

Na výstupním čele (zadní čelo) má vlhkostní spád průměrnou hodnotu 6,3 %, z čehož nejvyšší hodnota byla u vzorečku č. 6 (24,93 %) a nejnižší u vzorečku č. 8 (- 4,82 %).



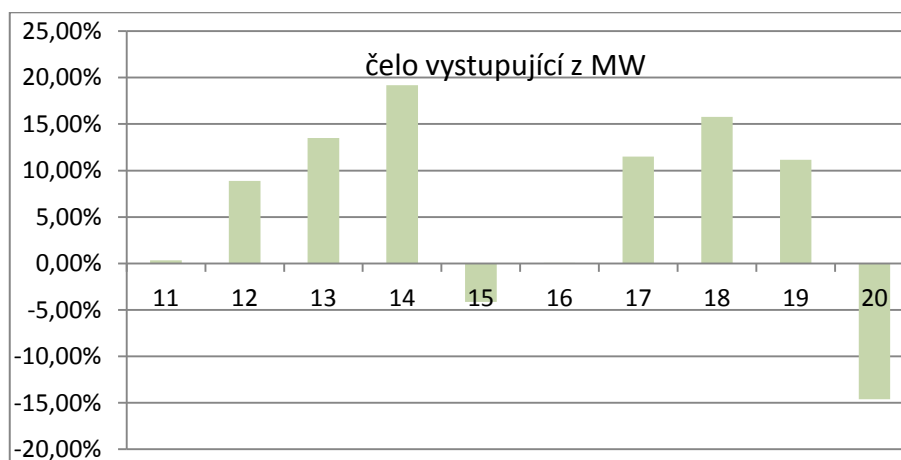
**Obr. 34** Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na vstupním čele vzorku.

Průměrný vlhkostní spád tangenciálních vzorků, hodnocený na čele vstupujícím (přední čelo) do MW linky je 7,2 %. Nejvyšší vlhkostní spád byl naměřen u vzorečku č. 13 (15,8 %), naopak nejmenší u vzorečku č. 14 (-9,96 %).



**Obr. 35** Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na středu vzorku.

Středové vzorečky mají průměrnou hodnotu 2,9 %. Nejvyšší vlhkostní spád byl naměřen u vzorečku č. 20 s hodnotou 18 %. Nejmenší pak u vzorečku č. 19 (-22 %).

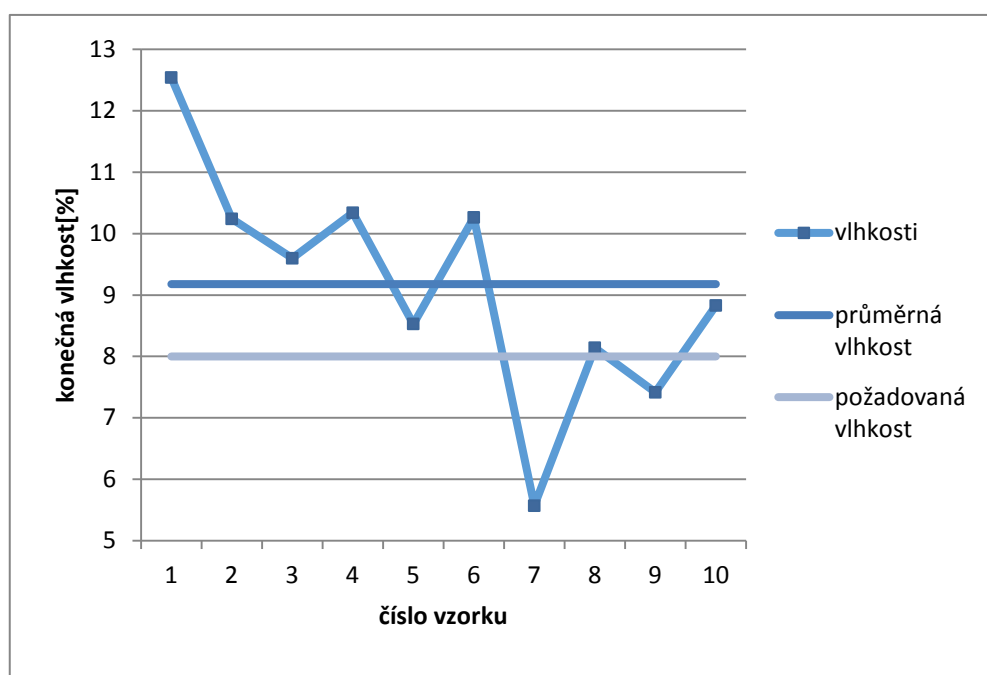


**Obr. 36** Vlhkostní spád vzorků s tangenciální orientací vláken. Vlhkostní spád je hodnocen na výstupním čele vzorku.

Na výstupním čele (zadní čelo) má vlhkostní spád průměrnou hodnotu 6,2 %, z čehož nejvyšší hodnota byla u vzorečku č. 14 (19,2 %) a nejnižší u vzorečku č. 20 (-14,6 %).

Rozdíl mezi vlhkostním spádem okrajových vzorků s tangenciální a radiální orientací vláken je nepatrný. Na vstupním čele je jeho hodnota rozdílná o 1,4 % a na výstupním čele je hodnota rozdílná o 0,1 %. Průměrné středové hodnoty jsou rozdílné o 3,8 %.

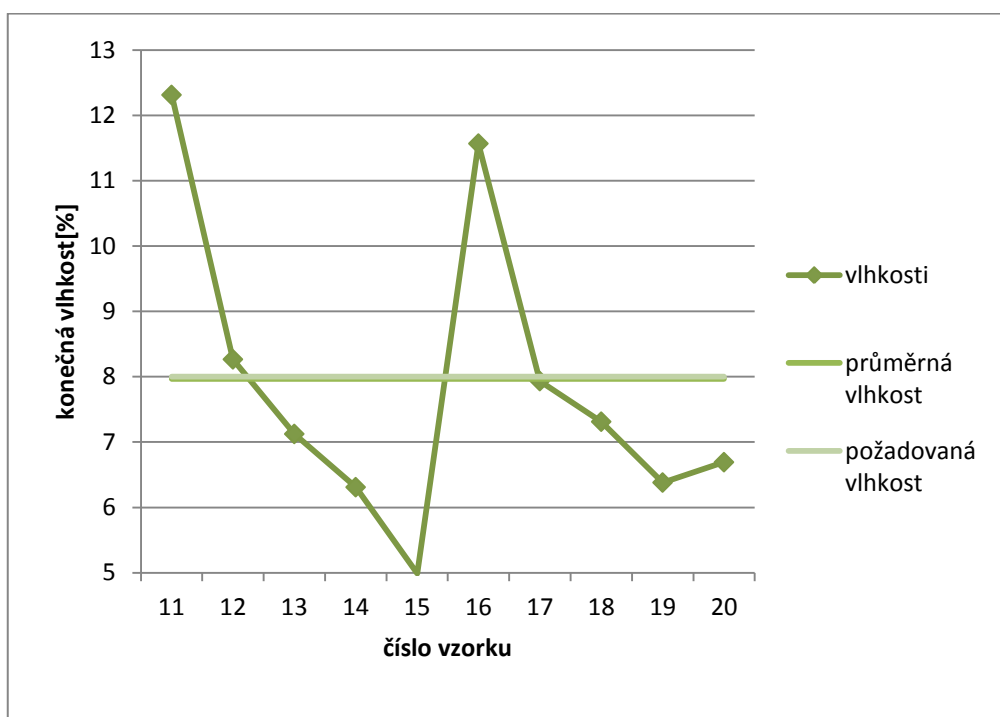
#### 4.6 Odchylka konečné vlhkosti od požadované



Obr. 37 Odchylka konečné vlhkosti od požadované u vzorků s radiální orientací vláken.

Na grafu číslo 37 jsou vidět jednotlivé vlhkosti vzorků po průchodu desátým cyklem. Nejvyšší naměřená vlhkost byla u vzorku č. 1 s hodnotou 12,54 % a nejnižší vlhkost u vzorku č. 7 s hodnotou 5,56 %. Průměrná hodnota vlhkosti těchto radiálních vzorků byla 9,18 %.

Kromě vzorku č. 1, 7 a 9 nebyly zaznamenány extrémní výkyvy výsledné vlhkosti od vlhkosti průměrné.



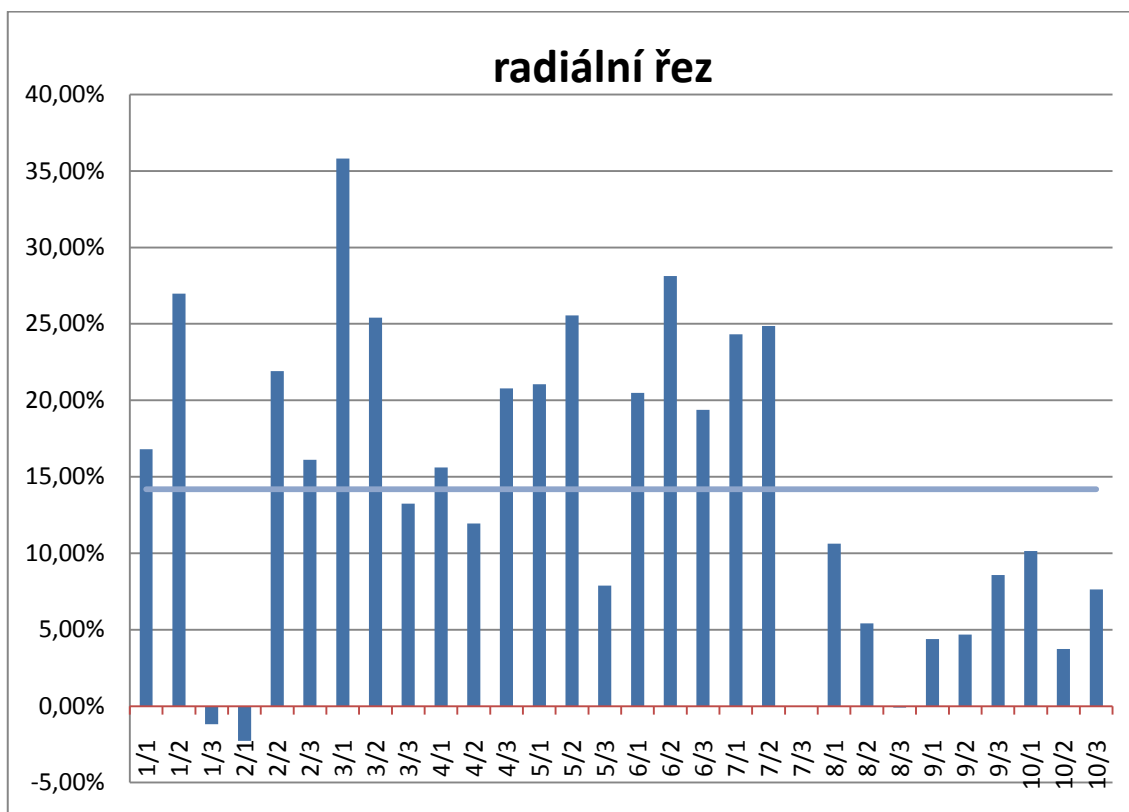
Obr. 38 Odchylka konečné vlhkosti od požadované u vzorků s tangenciální orientací vláken.

Na grafu č. 38 jsou vidět jednotlivé vlhkosti vzorků po průchodu desátým cyklem. Nejvyšší naměřená vlhkost byla u vzorku č. 11 s hodnotou 12,31 % a nejnižší vlhkost u vzorku č. 15 s hodnotou 4,98 %. Průměrná hodnota vlhkosti těchto tangenciálních vzorků byla 7,97 %. Kromě vzorků č. 11, 15 a 16 se vzorky se svojí vlhkostí neodklonily o víc než 2 %.

#### 4.7 Vidličková zkouška

Naměřené a vypočítané hodnoty pro vidličkovou zkoušku jsou uvedené v přílohách. Na obr. 39 a 40 je graficky znázorněno procentuelní zkornatění jednotlivých vzorků podle této zkoušky.

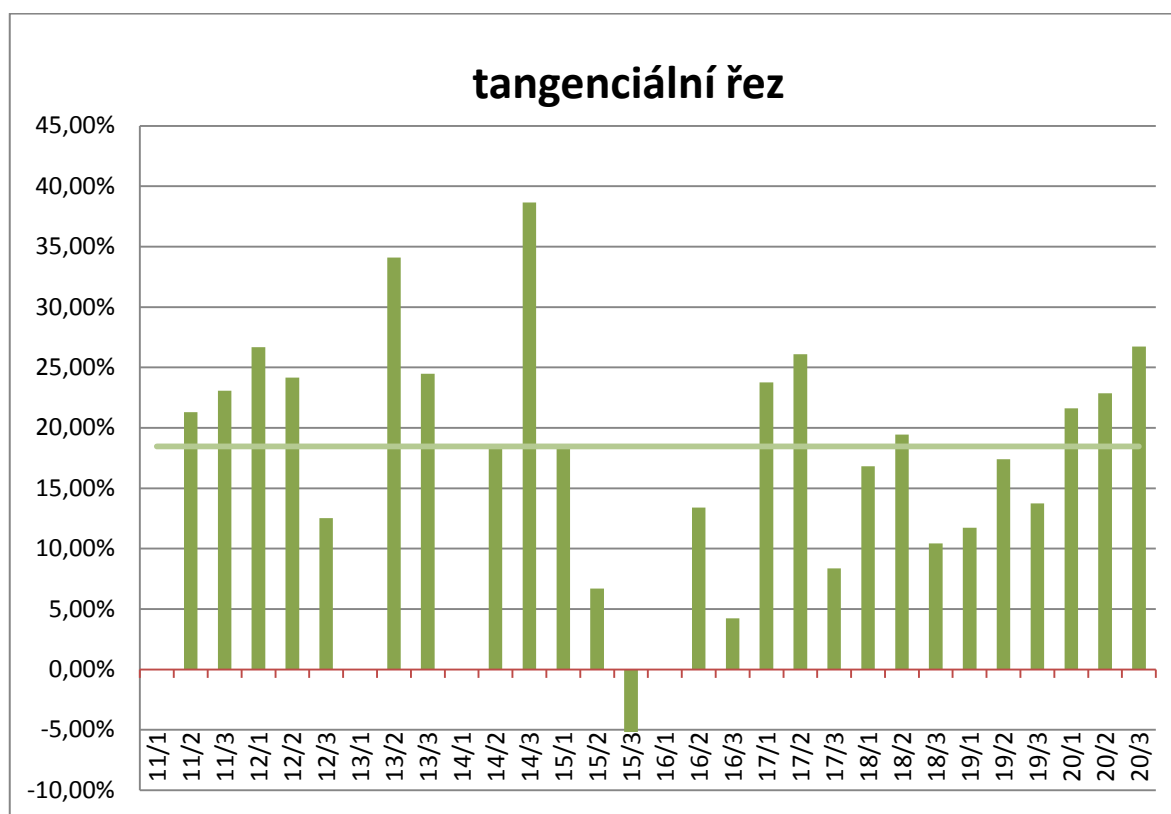




**Obr. 39 Vidličková zkouška u vzorků s radiálním řezem**

Průměrná hodnota zkornatění činila 14,18 %. Z obr. 16 je vidět, že ne všechny vzorky vidličky se díky zbytkovému napětí „uzavíraly“, ale například u vzorku 1/3, 2/1 a 8/3 byly naměřené hodnoty na konci vidličky větší, než původní rozměr. Vzorek 7/3 se nezměnil. Záporné hodnoty u tří zmiňovaných vzorků mohou být zapříčiněny růstovou vadou.

Průměrně bylo naměřeno největší napětí na vzorcích X/2, tedy na prostředním výřezu vzorečku, z velkého vzorku. Tato průměrná hodnota byla 17,86 %. Je to zapříčiněno pomalejším vysoušením prostřední části vzorku. Naopak nejmenší zbytkové napětí a to 9,23 % bylo naměřeno na vzorcích X/3, tedy na zadním konci vzorků. To je zapříčiněno pozvolnějším vnikem mikrovln a částečným ohřevem prostřední části vzorku. To znamená, že vzorek byl již mírně předeřhátý, na rozdíl od vstupujícího čela vzorku – X/1 s průměrnou hodnotou zkornatění 15,7 %.



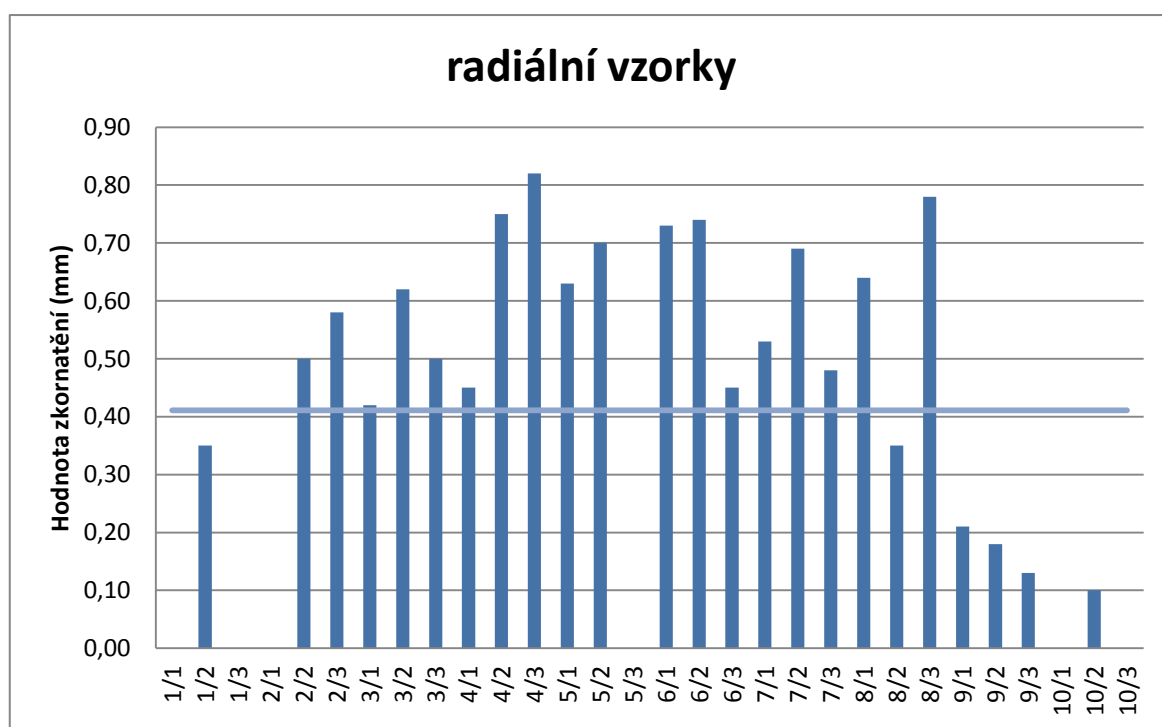
**Obr. 40** Vidličková zkouška u vzorků s tangenciálním řezem.

U vzorků s tangenciální orientací byla průměrná hodnota zkornatění o 4,28 % vyšší, tedy 18,46 %. Konce vidličky se rozevírají pouze u vzorečku 15/1. Zapříčiněno to může být opět růstovou vadou (zvlnění v okolí suku). U těchto vzorečků byla opět největší hodnota zkornatění z prostředí vzorku (Y/2) s průměrnou hodnotou 20,39 %. Opět je tato hodnota nejvyšší z důvodu pomalejšího vysoušení ze středu vzorku. Vysoká hodnota zkornatění (19,83 %) byla na čele vzorku, který vstupoval do sušárny jako první. (Y/1). U vzorečků s označením (Y/1) byly 4 vzorečky zničené při výrobě. K praskání dochází většinou podél dřevňových paprsků, proto je víc poničených vzorků u tangenciálně orientovaných výřezů (Šlezingerová, J., Gandelová, L. 1999). Průměrná hodnota vzorečků Y/3 byla 15,71 %.

U tangenciálních vzorků je zbytkové napětí vyšší v důsledku rychlejšího vysychání pomocí dřevných paprsků. Z radiálních vzorků by podle tabulky na zařazení řeziva dle jakosti bylo zařazeno 9 vzorků do 1. jakostní skupiny a 21 vzorků do 2. jakostní skupiny.

U radiálních vzorků spadá do 1. jakostní skupiny pouze 2 vzorečky. Do 2. skupiny 24 vzoreček, 4 jsou zničené.

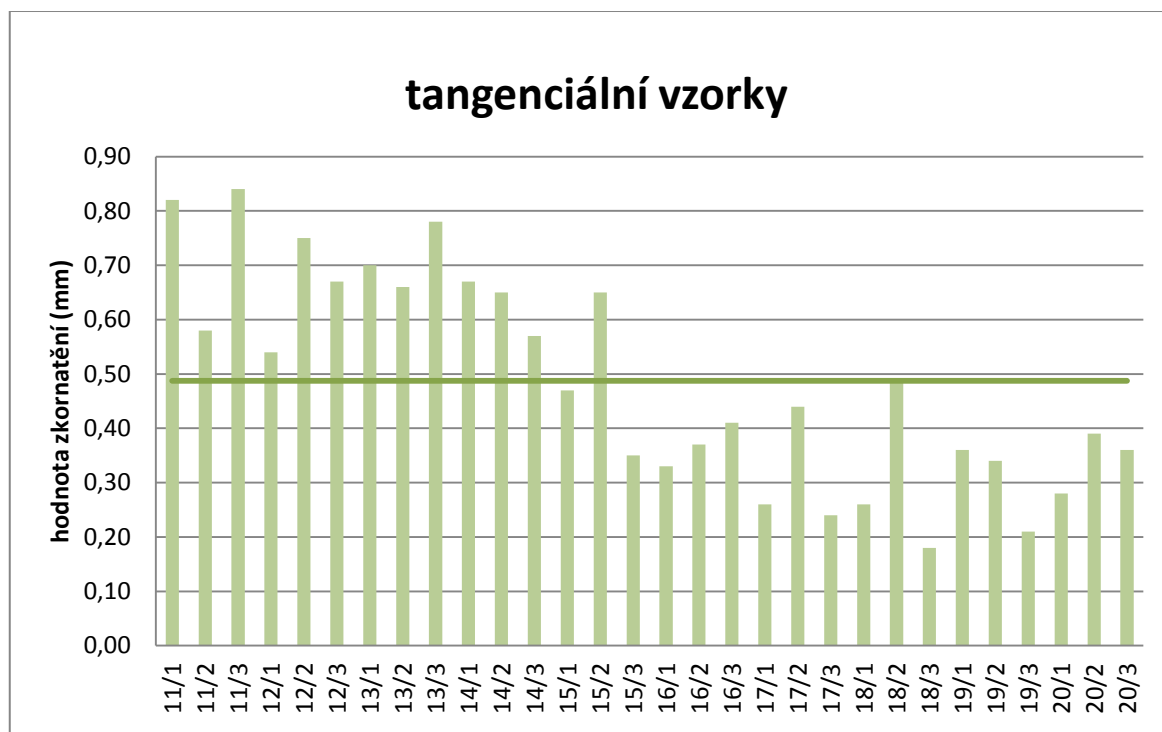
#### 4.8 Zkouška zkornatění středovým řezem



**Obr. 41** Zkouška zkornatění středovým řezem vzorků s radiální orientací.

Vzorky s radiální orientací měly průměrnou hodnotu zkornatění 0,41 mm, přičemž většina těchto maximálních průhybů byla v polovině vzorečku (poloha maximální hodnoty jednotlivých vzoreček v přílohách). U šesti vzoreček nebylo zjištěno žádné zbytkové napětí, všechny tyto vzorky byly z krajů sušeného vzorku. Vzorečky vyřezané ze vstupu sušeného vzorku, tedy vzorečky s označením X/1, mají průměrnou hodnotu 0,36 mm. U vzoreček X/2 bylo předpokládáno největší zbytkové napětí,

ale jeho průměrná hodnota 0,5mm byla předčena průměrnou hodnotou 0,61 mm u vzorečků X/3.



**Obr. 42** Zkouška zkornatění středovým řezem vzorků s tangenciální orientací.

Vzorky s tangenciální orientací vláken měly průměrnou hodnotu 0,49 mm. Tato hodnota je stejně jako u vidličkové zkoušky opět vyšší u tangenciálních vzorků než u radiálních a to z důvodu rychlejšího vysychání. U těchto vzorečků již nebyla žádná naměřená hodnota nulová. Nejmenší zbytkové napětí vykazovaly krajové vzorečky, konkrétně Y/1 bylo 0,47 mm a Y/3 bylo 0,46 mm. Hodnota vzorečku z prostřed sušeného vzorku s označením Y/2 byla 0,53 mm.

## 4.9 Stupeň jakosti sušeného řeziva

Tab. 2 Určení stupně jakosti vysušeného bukového dřeva

jakostní znak	orientace vláken	stupeň jakosti		
		1	2	3
odchylka konečné a požadované vlhkosti	radiální	1,18 %		
	tangenciální	0,03 %		
kolísání konečné vlhkosti	radiální	6,98 %		
	tangenciální	9,33 %		
Vlhkostní spád	radiální	4,64 %		
	tangenciální	5,40 %		
zkornatění	radiální	14,18 %		
	tangenciální	18,46 %		

V tabulce jsou zaznamenány naměřené hodnoty pro určení stupně jakosti vzorků. Sušení buku pomocí mikrovlnné kontinuální linky, je po stránce zkornatění vhodné pro 1. stupeň jakosti. Při zjišťování odchylky konečné vlhkosti od požadované, jsou tangenciální vzorky zařazeny do 1. jakostní skupiny a radiální vzorky do 2. skupiny. Co se týká vlhkostního spádu a kolísání konečné vlhkosti, jsou v obou případech zařazeny do 3. jakostní skupiny.

## 5 Diskuse

Z pohledu ovlivnitelnosti teploty dřeva musíme brát na vědomí, že dřevo je polárního charakteru, a proto nelze samotné dřevo za pomoci mikrovlnného záření ohřát. Pomocí mikrovln ohříváme pouze kapalinu, většinou vodu, která konvekcí předává svou teplotu dřevu. Proto je zpočátku s vyšší vlhkostí nárůst teploty větší, než posléze u suššího dřeva. Při pohledu na obr. 23 vidíme zpočátku velký nárůst teplot do třetího cyklu, posléze je nárůst teploty nepatrný. Dle mého názoru by při stejných vstupních teplotách vzorků docházelo s každým následujícím cyklem k nižší maximální teplotě až po úplné vysušení, kdy by se vstupní teplota rovnala teplotě výstupní.

Protože mikrovlnné záření ohřívá pouze vodu, je tento sušící princip vhodný především na sušení materiálu s vyšší vlhkostí. Při nižších vlhkostech se snižuje teplota dřeva a zpomaluje doba sušícího procesu. To je finančně nevýhodné. Dle mého názoru je mikrovlnné sušení velmi vhodné pro předsušení materiálů pro následné sušení například pomocí teplovzdušných sušáren.

Z uvedených výsledků je zřejmé, že vysychání, tedy vlastně pohyb vody je lepší u vzorků s tangenciální orientací vláken, než u vzorků radiálních. Lepší pohyb vody, tedy i rychlejší vysychání, je zajištěno pomocí dřeňových paprsků. To potvrzuje Gandelová et al (2009), která říká, že propustnost v radiálním směru (tedy souběžně s dřeňovými paprsky u našich tangenciálních vzorků) je lepší než v tangenciálním směru.

Difuse roste se zvyšující se teplotou do meze hygroskopicity. Díky tomu se zlepšuje pohyb vody ve dřevě a zároveň i její odvod ze dřeva ven. Zhruba v polovině procesu dochází k překročení meze hygroskopicity a poklesu úbytku vody. Přestože je teplota v nepatrném nárůstu, dochází k celkovému snížení vlhkosti ve dřevě a v důsledku toho i zhoršení pohybu vody vázané. Voda volná se už ve dřevě touto dobou nevyskytuje.

Dle mého názoru, může docházet během sesychání i k nepatrnému zmenšení vodivých cest a kvůli tomu i zhoršení podmínek pro odvod vlhkosti. Vzorky během sušení ztratily zhruba 1/4 své váhy.

### **Odchyłka konečné vlhkosti od požadované**

Požadavek na konečnou vlhkost byl 8 %. Výsledná vlhkost radiálních vzorků má průměrnou hodnotu 9,18 %, to je zapříčiněné již zmiňovanou zhoršenou propustností v tangenciálním směru. U tangenciálních vzorků byla naměřena hodnota 7,97 %, takže zde bylo dosaženo požadované vlhkosti s odchylkou tři setin. Daný rozdíl mezi konečnými vlhkostmi je díky již zmiňovaným propustnostem v jednotlivých směrech.

### **Kolísání konečné vlhkosti**

U radiálních vzorků bylo kolísání konečné vlhkosti s průměrnou hodnotou 9,18 %. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou byl necelých 7 %. Takto velký rozptyl byl zapříčiněn několika vzorky s extrémními hodnotami. Vyšší vlhkost může zapříčinit růstová vada, jako jsou například suky, reakční dřevo, kořenové náběhy nebo sbíhavost. Naopak vzorky s nižší vlhkostí mohou být následkem trhlin. U tangenciálních vzorků byl rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou

### **Vlhkostní spád**

Průměrné hodnoty vlhkostního spádu jednotlivých tangenciálních vzorků byly u okrajových částí (čele) kladné. To znamená, že vlhkost v prostřední části čelních vzorečku byla nižší než na jeho kraji. Což dokazuje působení mikrovln na celý průřez vzorku a vysoušení dřeva od středu vzorku. Vlhkost tedy proudí ze středu na okraj vzorku a posléze ven. Proto je konečná vlhkost středu nižší. Vlhkostní spád měřený na středu vzorku byl naměřen se zápornou hodnotou. To znamená, že zde byla naměřena vyšší vlhkost uprostřed než v okrajové části. To může být zapříčiněno horším pohybem vody v tangenciálním směru.

Hodnoty naměřené u radiálních vzorků u okrajových částí byly velmi podobné těm radiálním, avšak vlhkostní spád uprostřed vzorku byl kladný, což znamená, že samotný střed vzorku byl vysušen více než kraj.

Když zhodnotíme vlhkostní spád u radiálních a tangenciálních vzorků, tak dle mého názoru nedocílíme významných rozdílů. Sušené by tedy mohly být vzorky tangenciální i radiální najednou.

### **Zkornatění**

Zkornatění, neboli zbytkové napětí se do roku 2003 hodnotilo pomocí vidličkové zkoušky. Po roce 2003 byla vidličková zkouška nahrazena zkouškou středovým řezem.

Hodnota zkornatění měřeného pomocí vidličkové zkoušky u vzorků s radiálním řezem prokázala, že velmi záleží na růstových podmínkách stromu, jeho vadách, ale především na samotné pozici vzorku vzhledem k jádru stromu. Důkazem toho je velká variabilita hodnot zkornatění, která se pohybuje od -5 % až do 35 %. U záporných hodnot docházelo k rozevření vidličky namísto jejího zavření. To může být způsobeno například sukem, reakčním dřevem, nebo nepravidelným zvlněním dřevních vláken.

U tangenciálních vzorků byla průměrná hodnota vyšší více než o 4 %. Variabilita hodnot je v podobném rozložení jako u radiálních vzorků, ale do záporných hodnot se dostal pouze jeden prvek. U tangenciálních vzorků však došlo k několika znehodnocení zkušebních tělísek. Podle Šlezingerové a Gandelové (1999) dochází k praskání vzorečků podél dřeňových paprsků.

Radiální vzorky tedy vykazují menší zbytkové napětí, než vzorky tangenciální. To zapříčiňuje vnitřní napětí ve dřevě, které je způsobeno rozdíly v sesychání v tangenciálním a radiálním směru. Z toho vyplývá, že poměr tangenciálního a radiálního sesychání je vyrovnanější u vzorků ze středu kmene, tedy vzorků radiálních.

Zkouška středovým řezem je tedy zkouška aktuální. Při vyhotovování této zkoušky došlo ke ztížení měření v důsledku nedokonalého řezu středem tělíska. Zajímavým



---

faktem bylo, že ne ve všech případech došlo k maximálnímu zkornatění uprostřed tělíska. Toto může být opět ovlivněno strukturou dřeva a díky tomu rozdílnými rychlostmi vysychání jednotlivých oblastí vzorečku. Větších hodnot zkornatění dosáhly opět tangenciální vzorky, což již bylo vysvětleno u vidličkové zkoušky.

## 6 Závěr

Dřevo buku má široké uplatnění v nábytkářském průmyslu, ale i ve stavebnictví jako různé formy podlah nebo obkladů. Před použitím však musí být vysušeny na požadovanou vlhkost z důvodu rozměrové stálosti výrobku. Sušení bukového řeziva potřebuje měkčí sušící řád, kterého pomocí teplovzdušných sušáren dosáhneme, ale s vyšší cenou. Mikrovlnné sušárny díky faktu, že vysouší řezivo ze středu směrem k okraji, změkčují sušící řád a tím zlepšují kvalitu sušeného materiálu a to mnohem rychleji než sušárny jiných typů.

Předmětem této diplomové práce bylo posoudit vliv mikrovlnného sušení na vzorky bukového dřeva. Cílem této práce bylo rozebrat problematiku využití mikrovlnného ohřevu k úpravě vlastností dřeva. Výsledná jakost sušení byla zjištěna podle příslušné normy. Mezi požadovaná kritéria pro hodnocení jakosti patřila odchylka konečné vlhkosti od požadované, kolísání konečné vlhkosti, vlhkostní spád a zbytkové napětí.

Experimentální sušení bylo prováděno na mikrovlnné kontinuální lince o výkonu 1,5 kW, frekvenci mikrovln 2,45 MHz a rychlosti posuvu pásového dopravníku  $0,2 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ . Experiment byl prováděn na vzorečkách s tangenciální a radiální orientací vláken.

V práci bylo zjištěno, že sušení dřeva buku pomocí mikrovlnné kontinuální linky je po stránce zkornatění vhodné pro 1. stupeň jakosti. Co se týče odchylky konečné vlhkosti dřeva od požadované, je sušící vzorek s tangenciální orientací vláken zařazen také do 1. jakostní skupiny, vzorky s radiální orientací již spadají do skupiny 2. Co se týká vlhkostního spádu a kolísání konečné vlhkosti, jsou v obou případech zařazeny do 3. jakostní skupiny. To je dáno především vzorky s extrémní hodnotou.

Závěrem lze tedy říci, že samotná mikrovlnná sušárna je vhodná pro přípravu řeziva i pro 1. stupeň jakosti po stránce zbytkového napětí, na snížení vlhkostního spádu a odchylek konečné vlhkosti by bylo vhodné materiál dosušit například horkovzdušnou sušárnou. Po snížení výkonu sušárny by bylo možné dosáhnout ještě menšího zbytkového napětí. Ovšem na sušení podlah a obkladů stačí pouze 2. jakostní stupeň. V tomto případě by bylo možné výkon mikrovlnné linky ještě zvýšit.

## 7 Summary

Beechwood has wide application in furniture industry, but also in building industry as various forms of floors or wall facings. Before use it must be dried on required moisture due to dimensional stability. Drying of the beechwood requires softer drying procedure, which we can achieve with hot air drying machines, but with higher cost. Microwaves drying machines, thanks to the fact, that they dry the wood from the middle to the edge, soften the drying procedure and by that improves quality of the dried material and do it much faster then other types of drying machines.

The object of this diploma work was to assess the impact of microwave drying on samples of beechwood. The target of this work was to analyze the problematics of using microwave heat for adjustment of wood properties. The final quality of drying was find out according to the appropriate standard. Required criteria for quality rating were deviation of final moisture from required, fluctuation of final moisture, moisture gradient and residual tension.

Experimental drying was done on continuous microwave line with power of 1,5 kW, microwave frequency 2,45 MHz and speed of the machine belt  $0,2 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ . The experiment was done on samples with tangent and radial orientation of fibers.

In this work was found out, that drying the beechwood using microwave continuous line is suitable for 1st grade of quality in terms of crustiness. In terms of deviations of final wood moisture from the required, drying sample with tangent orientation of fibers is also in the 1st quality grade, samples with radial orientation are in the 2nd quality grade. In terms of moisture gradient and fluctuation of final moisture, both cases are in the 3rd quality grade. It is caused mainly by the samples with extreme value.

In conclusion, continuous microwave line is suitable for preparing of the wood even for 1st quality grade in terms of residual tension. For lowering the moisture gradient and deviation of final moisture it would be suitable to do the final drying of the material in the hot air drying machine. After lowering the power of the drying machine it would be possible to reach even lower residual tension. Though for drying of the floors and wall facings is 2nd quality grade enough. In this case it would be possible to even increase the power of the drying machine.

## 8 Literatura

- ANTTI, L. (1999). *Heating and drying wood using microwave power*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Division of Wood Physics, Skelleftea Campus, Sweden
- BRODIE, G. I. (2008). *Innovative wood drying: applying microwave and solar technologies to wood drying*, Saarbrücken: VDM Verlag, 110 s.
- DEDIC, A. AND ZLATANOVIC, M. (2001) *Some aspects and comparisons of microwave drying of beech (Fagus moesiaca) and fir wood (Abies alba)*. Holz als Roh- und Werkstoff 59 (4): 246-249.
- DEJMAL, A. (1995). *Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1995. 192 s. ISBN 80-7157-163-3.
- EGNER, K., JAGFELD, P. (1964). *Verstiche zur künstlichen Trocknung von Holz durch Mikrowellen*. Beilage „Moderne Holzverarbeitung“, Holz-Zentralblatt 129, 297-300.
- GROSSER, D. *Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehrantlas*. 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977 ISBN 3-540-08096-1.
- HÁJEK M.: *Mikrovlny v akci*. UCHP ČSAV – výukový film.
- HANSSON, L., ANTTI, L. (2008). *Modeling Microwave Heating and Moisture Redistribution in Wood*. *Drying Technology*, vol. 26, issue 5, 552-559.
- HUNT, J. R., GU, H., WALSH, P. AND WINANDY, J. E. (2005). *Development of new microwavedrying and straightening technology for low value curved timber*. F. P. Laboratory, United States Department of Agriculture.
- GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J., HORÁČEK, P. (2009): *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2

- KOLLMANN, F. (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1951. 870 s.
- LEIKER, M.; AURICH, K.; ADAMSKA, M. A. (2005). *Accelerated drying of single hardwood boards by combined vacuum-microwave application*, 9th Intl. IUFRO Wood Drying Conf. Nanjing, China, 185-190.
- LEIKER, M. A ADAMSKA, M. A. (2004): *Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood*. Holz als Roh- und Werkstoff 62, 203-208
- LEIKER, M.; ADAMSKA, M. A.; MOLLEKOPF, N. (2004b). *Microwave drying of single wood boards in multimode cavities*. Proceedings of Intl. Workshop and Symposium on Drying, Mumbai, India.
- MOLLEKOPF, N. AND WAGENFÜHR, A. (2002). *Neues Verfahren verbessert Schnittholztrocknung*. Holz-Zentralblatt. 137, 1627.
- NASSWETTROVÁ, A. (2012): *Vliv vysokofrekvenční elektromagnetické energie mikrovlnného pásma na strukturu dřeva a na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva*. Brno 2012, 165 s. Disertační práce. Mendelova univerzita.
- NASSWETTROVÁ, A. (2008): *Analýza přeměny mikroskopické struktury a fyzikálních procesů vybraných dřevin, vlivem vysokofrekvenční elektromagnetické energie mikrovlnného pásma*. Brno 2008, 137 s. Diplomová práce. Mendelova univerzita.
- NASSWETTROVÁ, A., NIKL, K. (2011). *Microscopic identification of changes in beech (*Fagus Sylvatica L.*) and pine (*Pinus Sylvestris L.*) cell structure after drying using high-frequency energy of the microwave band*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, sv. 1, 173-181.
- NEČESANÝ, V. (1956). *Struktura reakčního dřeva*. Praha: Preslia,
- OLOYEDE, A., GROOMBRIDGE, P. (2000). *The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood*, J. Mater. Process. Technol. 100, 67-73.

- PECINA, P., PECINA, J. (2006). *Materiály a technologie- dřevo*. Brno: MU, 2006. ISBN 80-210-4013-0.
- PERELYGIN, L. M., (1965). *Naúka o dreve*. 2.ed. Bratislava: SVTL, 448 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997): *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda a.s., 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4
- PRASAD, B. E. a Krishna K. PANDEY. (2012). *Microwave drying of bamboo: Collaborative Research Integrating Product Design for New Materials Development*. European Journal of Wood and Wood Products. 2012, vol. 70, 1-3, 353-355.
- RESCH H (1968). *Microwaves for the drying of wood products*. Holz Roh-Werkstoff 26:317–324.
- ROMILL spol.s.r.o., (2005). *Firemní literatura a presentace – kolektiv autorů*. Brno.
- SANDOVAL-TORRES S., JOMAA W., MARC F., PUIGGALI J.R. (2010). *Causes of color changes in wood during drying*, Forestry Studies in China, 2010, 12(4), 167–175.
- SEYFARTH, R.; LEIKER, M.; MOLLEKOPF, N. (2003). *Continuous Drying of Lumber in a Microwave Vacuum Kiln*, Proceedings of 8th International IUFRO Wood Drying Conference, 159 – 163.
- STENUDD, S. (2003). *Colour Response of Silver Birch to Press Drying*, Proceedings of the ,8-th International IUFRO Wood Drying Conference, 449-454.
- ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. (2002): *Stavba dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. 187 s. ISBN 978-80-7157-636-5.
- TORGOVNIKOV, G. I., VINDEN, P. (2009). *High intensity microwave wood modification for increasing permeability*, Forest Products Journal, 84-92.

- ÚRADNÍČEK, L., et al. (2001). *Dřeviny České republiky*. 1. Vyd. Písek: Matice Lesnická, spol. s.r.o., 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.
- VINDEN, P., TORGOVNIKOV, G., HANN, J. (2011). *Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment*. Eur J Wood Prod.
- VONGPRADUBCHAI, S., RATTANADECHO, P. (2009). *The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier*, Chemical Engineering and Processing 33, 472–481.
- XIMING W., ZHENG HUA X., LIHUI S., WEIHUA Z. (2002). *Preliminary study on microwave modified wood*, China Wood Industry Journal. 16(4), 16-19.
- ZHANG, Y., JIA, K., CAI, L., SHI, S. Q. (2013). *Acceleration of Moisture Migration in Larch Wood Through Microwave Pre-Treatments*. Drying Technology, vol. 31, issue 6, 666-671.
- ZIELONKA, P., GIERLIK, E. (1999). *Temperature distribution during conventional and microwave wood heating*. Hols als Roh- und Werkstoff 57, 247-249.
- ČSN 49 0646: Řezivo – metoda stanovení zkornatění. ÚNM Praha 2003
- ČSN 49 0651: Umělé sušení řeziva. ÚNM Praha 1989
- Lesnický naučný slovník*: 1. Díl – A-O. Předseda redakční rady Zdeněk Poleno. 1. Vyd. Praha: Ministerstvo zemědělství, 1994. 743 s. ISBN 80-7084-111-7.
- Prečo je v mikrovlnke teplo*: Doc. RNDr. František Kundracik, CSc [online]. 2005 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <http://www.uniba.sk>
- Hydrotermická úprava dřeva – cvičení* [online]. 2010 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://ldf.mendelu.cz>

*Sanace dřeva* [online]. 2011 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://sanace-dreva.cz>

*Vliv mikrovlnného ohřevu na rozdělení povrchových teplot*: BANIČOVÁ, D. [online]. 2016 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz>

*Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015* [online]. [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://eagri.cz>

*Práce se dřevem* [online]. 2005 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://prace-se-drevem.spibi.cz>

*Ústav nauky o dřevě* [online]. 2016 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://wood.mendelu.cz>

*Svět vědy – mikrovlnné sušení* [online]. 2017 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://svetvedy.cz/mikrovlnne-suseni>

*Microwave* [online]. 2017 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://2.electron.frba.utn.edu.ar>

*Magnetron* [online]. 2015 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/podr1.html>

*Elektromagnetické spektrum* [online]. 2016 [cit. 2017-4-3]. Dostupný z WWW: <http://www.ceskatelevize.cz>