

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Vliv mikrovlnné předúpravy dřeva a modifikace impregnační metody
na impregnovatelnost smrkového dřeva a jeho vybrané mechanické
vlastnosti**

Diplomová práce

2016/2017

Dominik Hess

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: *Vliv mikrovlnné předúpravy dřeva a modifikace impregnační metody na impregnovatelnost smrkového dřeva a jeho vybrané mechanické vlastnosti*, vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47 b 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:

.....

Bc. Dominik Hess

Poděkování

V první řadě děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Baarovi, Ph.D., za ochotu, odborné připomínky a trpělivost. Další poděkování patří Ing. Petru Pařilovi, Ph.D., za pomoc a odborné konzultace během impregnace dřeva, Ing. Jakobovi Dömény, Ph.D., který mi pomáhal při mikrovlnné úpravě vzorků. Velké díky patří i mé rodině a přítelkyni, kteří mě celou dobu podporovali.

Abstrakt

Jméno: Bc. Dominik Hess

Název: Vliv mikrovlnné předúpravy dřeva a modifikace impregnační metody na impregnovatelnost smrkového dřeva a jeho vybrané mechanické vlastnosti

Tato diplomová práce se zabývá vlivem mikrovlnné předúpravy dřeva a modifikace impregnační metody Bethell na impregnovatelnost smrku ztepilého (*Picea abies*) s ohledem na jeho vybrané mechanické vlastnosti. Hlavním cílem bylo zjištění příjmu impregnační látky a hloubky průniku v příčném směru u jednotlivých skupin impregnovaných vzorků, dále je pak podrobit experimentálním zkouškám pro zjištění mechanických vlastností dřeva a porovnat se skupinou referenčních vzorků (neimpregnovaných).

Po vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že příjem ochranné látky a hloubky průniku se zvyšuje v závislosti na čase (modifikaci) impregnace, zatímco při použití mikrovlnné předúpravy dřeva se hodnoty mírně snižují. Mikrovlnná modifikace ani úprava impregnační metody neměly vliv na mechanické vlastnosti.

Klíčová slova: smrk ztepilý, impregnace dřeva, mikrovlnná modifikace, impregnovatelnost, Bethell, příjem látky, hloubka průniku, propustnost, mechanické vlastnosti

Abstract

Name: Bc. Dominik Hess

Title: Influence of microwave pretreatment of wood modification and impregnation methods on the treatability of Norway spruce (*Picea abies*) and selected mechanical properties

This thesis examines the influence of microwave pretreatment of wood modification and Bethell impregnation methods on the treatability of Norway spruce (*Picea abies*) in consideration with its mechanical properties. The aim of this work was to establish the intake of impregnants (preservatives) and the depth of penetration in transverse direction of each treatment group with impregnated specimens. Further experimental examinations that were focused on the assessment of mechanical wood properties and the comparison with references (non-impregnated specimens) followed.

Results showed that the intake of impregnants and the depth of penetration increases with time (modification) of the impregnation treatment. In contrast, microwave wood treatment actually decreases those values. Neither microwave modification nor adjustment of impregnation method had an influence on mechanical wood properties.

Key words: norway spruce, impregnation of wood, microwave modification, treatability, Bethell, intake, penetration, permeability, mechanical properties

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíl práce	11
3	Literární přehled.....	12
3.1	Smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>).....	12
3.1.1	Makroskopická stavba	12
3.1.2	Mikroskopická stavba.....	13
3.1.3	Chemické složení.....	15
3.1.4	Využití smrkové dřeva v praxi	16
3.1.5	Přirozená trvanlivost smrkového dřeva	16
3.2	Impregnace dřeva.....	18
3.2.1	Klasifikace impregnovatelnosti	18
3.2.2	Chemické složení ochranné látky	19
3.2.3	Metody impregnace dřeva	19
3.2.3.1	Technologie povrchového ošetření dřeva.....	19
3.2.3.2	Technologie hloubkové impregnace dřeva.....	20
3.2.4	Způsob modifikace impregnačního procesu.....	22
3.3	Vybrané vlastnosti dřeva ovlivňující impregnovatelnost	23
3.3.1	Vlhkost dřeva.....	23
3.3.2	Pohyb vody ve dřevě	23
3.3.3	Pórovitost dřeva.....	23
3.3.4	Propustnost / impregnovatelnost dřeva	24
3.4	Mikrovlnná modifikace pro zvýšení propustnosti dřeva	25
3.4.1	Mikrovlny obecně.....	25
3.4.2	Mikrovlnný ohřev	26
3.4.3	Autoři zabývající se vlivem mikrovlnné modifikace na změnu propustnosti dřeva	26

3.5	Mechanické vlastnosti dřeva.....	28
3.5.1	Napětí a deformace dřeva.....	28
3.5.1.1	Pevnost dřeva v tlaku podél vláken.....	29
3.5.1.2	Pružnost dřeva v tlaku podél vláken.....	30
4	Materiál, metodika a příprava měření.....	31
4.1	Použitá zařízení a pomůcky v laboratoři.....	31
4.2	Zkušební vzorky.....	31
4.2.1	Výroba zkušebních vzorků.....	31
4.2.2	Stanovení skupin vzorků a jejich označení.....	33
4.3	Předúprava vzorků mikrovlnnou modifikací.....	33
4.4	Impregnace dřeva.....	35
4.4.1	Úprava a vážení zkušebních vzorků.....	35
4.4.2	Impregnační roztok.....	36
4.4.3	Úprava impregnačních procesů.....	36
4.4.4	Impregnační linka.....	37
4.4.5	Průběh vakuově tlakové impregnace.....	37
4.4.6	Vážení impregnovaných vzorků.....	38
4.4.7	Vyhodnocení příjmu impregnační látky.....	38
4.5	Měření míry proimpregnování a hloubky průniku.....	38
4.6	Mechanická zkouška.....	40
4.6.1	Příprava vzorků na mechanickou zkoušku.....	40
4.6.2	Postup mechanické zkoušky.....	41
4.7	Statistické vyhodnocení.....	41
5	Výsledky.....	42
5.1	Příjem impregnační látky.....	42
5.2	Hloubka průniku.....	45
5.3	Míra proimpregnování.....	48

5.4	Mez pevnosti (MOR) v tlaku podél vláken	52
5.5	Modul pružnosti (MOE) v tlaku podél vláken.....	54
6	Diskuse.....	56
6.1	Příjem impregnační látky.....	56
6.2	Hloubka průniku	58
6.3	Míra proimpregnování	59
6.4	Mechanické vlastnosti.....	60
7	Závěr	62
8	Summary	64
9	Seznam použité literatury.....	65

1 Úvod

Dřevo je jeden z prvních materiálů, který člověk začal zpracovávat a jehož bohaté užívání je typické pro lidskou civilizaci všech dob a zemí. Jeho význam je nezastupitelný zejména od časů, kdy začalo sloužit jako materiál k výrobě nástrojů, povozů, lodí, nábytku a dalších. Svoje postavení si udrželo nejen pro svůj příjemný a teplý přírodní charakter, ale i kvůli univerzálním fyzikálním vlastnostem, snadnému opracování a možnosti uplatnit se v moderních technologiích. Díky jeho vlastnostem má dřevo vysoké uplatnění při výrobě dřevěných konstrukcí, roubených a srubových staveb, telekomunikačních sloupů, železničních pražců, nábytku a ve spoustě jiných dalších odvětví. Přes své pozitivní vlastnosti, má také i několik negativních, jako je např. degradace abiotickými a biotickými (dřevokazné houby a hmyz) činiteli, kvůli kterým dřevo ztrácí své původní vlastnosti.

Aby byla co nejvíce omezena degradace dřeva, začala se využívat jeho impregnace. Již staré civilizace, jako je Čína, Řím či Egypt začaly dřevěné materiály ošetřovat živočišnými a minerálními oleji. Již v průběhu 16. století byly na některých obchodních plavidlech nalezeny stopy po vsakování dehtu do dřeva, pro zlepšení jeho vlastností.

Průmyslová impregnace dřeva je využívána posledních 200 let. Významnou osobností je Angličan Bethell, který přišel s metodou plného nasycení dřeva a začal v průmyslové impregnaci používat dehtový olej, metoda je založena na působení podtlaku a přetlaku. Tento způsob impregnace se uplatňuje dodnes a jeho postupů využívá například společnost Impregnace Soběslav s.r.o., zabývající se průmyslovou impregnační dřeva, která se specializuje především na výrobu a tlakovou impregnaci dřevěných sloupů a pražců.

I přes pokročilé metody impregnačních technologií, se v dnešní době usiluje o zdokonalení proimpregnování některých obtížně impregnovatelných druhů dřevin. Zejména se jedná o smrk ztepilý, který patří mezi nejvíce využívané jehličnany v celé Evropě a Asii. Pro zvýšení impregnovatelnosti se zkouší úprava impregnačních metod, např. prodloužením času nebo různými chemickými, fyzikálními a mechanickými technologiemi. Velmi diskutabilní metodou pro zvýšení propustnosti je využití mikrovlnné modifikace dřeva, která funguje na principu elektromagnetického záření interagujícího s polárními látkami, jako je například voda.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjistit vliv mikrovlnné předúpravy dřeva pomocí dvou odlišných režimů mikrovlnného záření s klasickou impregnační metodou Bethell a nemodifikovaných vzorků s upravenou metodou impregnace na impregnovatelnost vyzrálého dřeva smrku ztepilého (*Picea abies*). Mezi hlavní zjišťované veličiny patří příjem ochranného prostředku, hloubka průniku a míra proimpregnování u jednotlivých sad vzorků. Dílčím cílem této práce je porovnat mechanické vlastnosti dřeva zaměřené na mez pevnosti (MOR) a modul pružnosti (MOE) impregnovaného dřeva ve srovnání se dřevem neimpregnovaným.

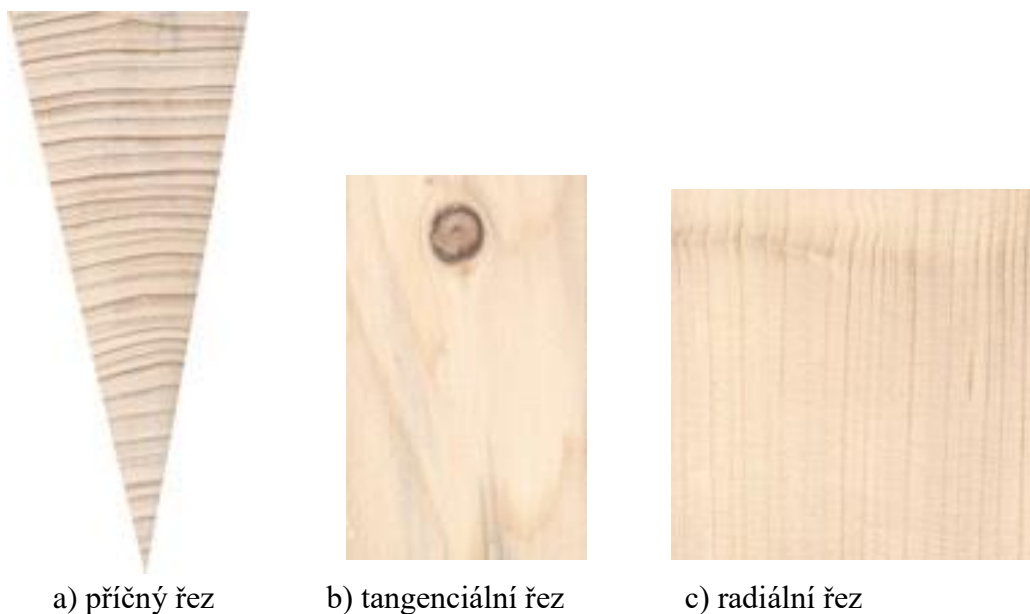
3 Literární přehled

3.1 Smrk ztepilý (*Picea abies*)

Smrk ztepilý je v pozoruhodném množství zastoupený po celé Evropě a Asii. Patří mezi nejvíce ekonomicky cenné a využívané jehličnany, ze kterého se vyrábí vysoce kvalitní dřevo a výrobky ze dřeva (Tjoelker et al. 2007). Z celkové plochy dřevin v České republice, jehličnany tvoří 58,9 % porostu, smrk ztepilý zde zaujímá až 44,1 %, což dokazuje jeho přední postavení mezi lokálními dřevinami (ÚHÚL 2016).

3.1.1 Makroskopická stavba

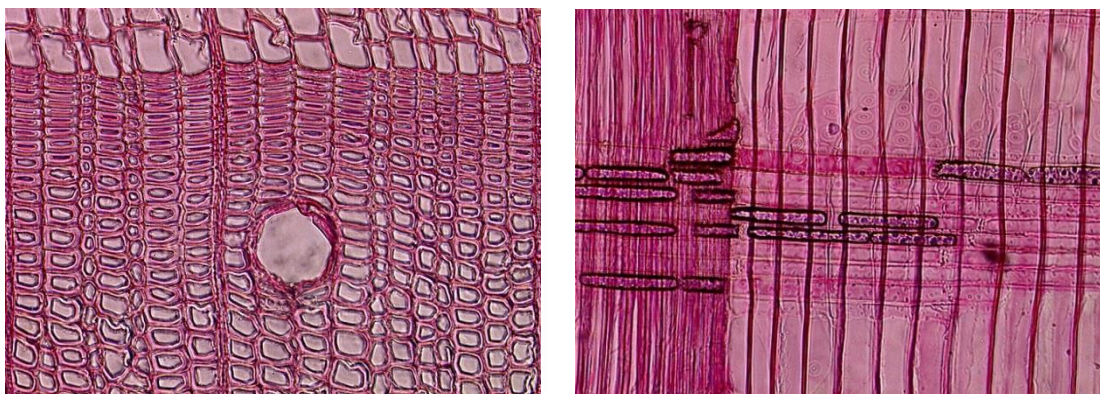
Dřevo nemá viditelné jádro, v čerstvě pokáceném stavu lze pozorovat zónu vyzrálého dřeva, jehož barva je bílá až žlutobílá a na světle žloutne. Má pozvolný přechod od jarní části letokruhů k letní (Obr. 1). Pryskyřičné kanálky jsou malé, roztroušené, lidským okem pozorovatelné jen na dobře upravených podélných řezech, jako jemné tmavší rýžky (Klement et al. 2010). Smrk se s jeho nízkou hustotou ($\rho_0 = 420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) řadí mezi lehké dřevo, které má rovněž malou tvrdost (26 MPa), (Vavrčík et al. 2002).



Obr. 1 Jednotlivé makroskopické řezy smrku ztepilého (<http://wood.mendelu.cz>)

3.1.2 Mikroskopická stavba

Jehličnaté dřevo je vývojově starší než listnaté a odlišuje se jednodušší anatomickou stavbou (Obr. 2). Hlavními a převládajícími elementy jsou tracheidy (cévice) a parenchymatické buňky (Wagenführ 1999).



a) příčný řez

b) radiální řez



c) tangenciální řez

Obr. 2 Mikroskopické řezy dřeva smrku ztepilého (<http://wood.mendelu.cz>)

Tracheidy

Tracheidy smrku představují přibližně 92,5–95 % celého objemu dřeva (Tab. 1). V rámci jednoho ročního letokruhu se tracheidy jarního a letního dřeva vzájemně velmi liší (Perelygin 1960). Jarní tracheidy vznikají na začátku vegetačního období a mají převážně vodivou funkci. Jsou to tenkostěnné buňky se širokým lumenem a s četnými dvojtečkami, které se po vyschnutí převážně uzavírají. Letní tracheidy se tvoří v druhé polovině vegetačního období a mají mechanickou funkci. Jsou tlustostěnné s délkou přibližně o 10 % větší než jarní tracheidy. Dvojtečky v letním dřevě zůstávají po vysušení převážně otevřené (Požgaj et al. 1997).

Parenchymatické buňky

Parenchymatické buňky mají tvar kratších hranolků, válců nebo vřeten. Buněčné stěny jsou zdřevnatělé a jejich funkce je vodivá i zásobní. Slouží k vedení živin, růstových látek a k ukládání zásobních látek (hlavně škrobu). Podílí se při tvorbě dřevných paprsků (heterocelulární), pryskyřičných kanálek a podélného (axiálního) dřevního parenchymu (Šlezingerová et al. 2008). Pryskyřičné kanálky plní přirozenou ochrannou funkci dřeva, je možno odlišit kanálky horizontální a vertikální, které jsou navzájem propojeny a tvoří ve dřevě souvislou síť (Gryc, Horáček 2005).

Tab. 1 Anatomické elementy dřeva smrku s uvedením jejich funkce a podílem zastoupení (Perelygin 1960)

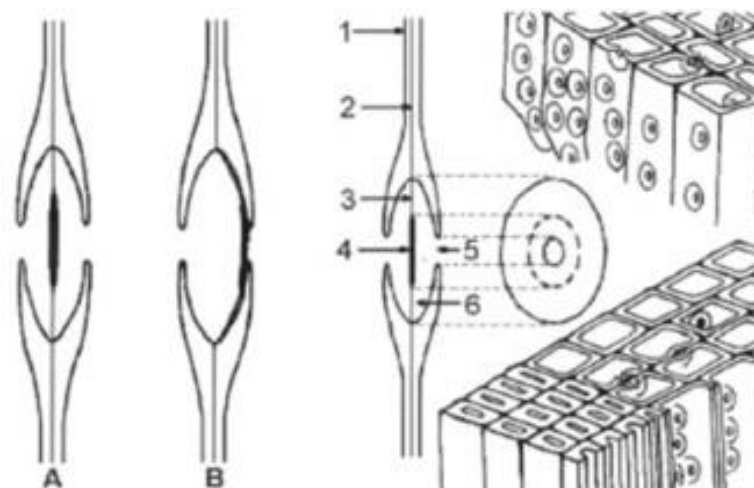
Druh buněk	Hlavní funkce	Podíl ve dřevě
Tracheidy	vodivá, mechanická	92,5–95 %
Dřevné paprsky	zásobní, pomocná vodivá	5,0–7,2 %
Pryskyřičné kanálky	vodivá, vylučovací	0,2–0,3 %
Dřevní parenchym	Zásobní	málo

Ztenčiny buněčných stěn

V buněčné stěně jsou místa, kde chybí sekundární struktury a dochází k transportu látek, nebo vody s rozpuštěnými minerálními látkami přes tzv. uzavírací blanku nebo membránu tvořenou primárními stěnami a střední lamelou. Rozsáhlá koncentrace těchto buněk se vyskytuje na zúžených koncích tracheid, převážně radiálních a v menším množství i na tangenciálních stěnách. U jehličnanů můžeme pozorovat tři typy ztenčiny, jedná se o jednoduché ztenčiny (tečky), dvůrkaté ztenčiny (dvojtečky) a poloviční ztenčiny (Požgaj et al. 1997, Rowell 2012). Průměr dvojteček u smrku se pohybuje mezi 8–31 μm (Kurjatko a Reinprecht 1993).

Při snižování vlhkosti dřeva dochází k odchýlení membrány dvojtečky v tracheidách a tím k uzavření torusu, což způsobuje silný odpor vůči proudění tekutin a transportu látek ve dřevě (Obr. 3). Elasticita membrány umožňuje, že torus funguje jako ventil (Perelygin 1960).

Požgaj et al. (1997) také uvádí, že torus při prvním seschnutí v jarním dřevě přilehne k porusu a omezí tím možnost impregnace (výrazně u smrku) oproti letnímu dřevu, kde se ztenčiny uzavírají jen ojediněle.



Obr. 3 A – dvojtečka v otevřeném stavu, B – uzavřená dvojtečka při sušení: Struktura dvojtečky v jarním dřevě: 1 buněčná stěna (sekundární), 2 střední lamela (primární stěna), 3 margo, 4 torus, 5 porus, 6 vnitřní plocha dvojtečky (Pánek et al. 2013)

3.1.3 Chemické složení

Hlavní chemické složky dřeva jsou celulóza, hemicelulózy a lignin. Kromě těchto tří biopolymerů jsou ve dřevě obsažené další chemické složky, které souhrnně nazýváme extraktivní látky (Tab. 2), (Lewin a Goldstein 1991).

Celulóza je základní stavební látkou zdřevnatělých buněčných stěn dřeva, řadíme ji k polysacharidům. Ve dřevě jehličnanů je zastoupení celulózy 46–56 % (Perelygin 1960).

Hemicelulózy jsou podle chemického složení velmi blízké celulóze, ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Nejvíce se to projevuje při sušení, vaření, páření a lisování dřeva (Šlezingerová a Gandelová 2001). Wagenführ (2000) udává obsah hemicelulóz ve smrku přibližně 27,6 %.

Lignin je třetí hlavní složkou buněčné stěny (20–30 %), slouží jako tmel mezi dřevěnými vlákny a jako bariéra k enzymatické degradaci buněčné stěny (Lewin a Goldstein 1997).

Doprovodné složky dřeva jsou organické a taky anorganické látky, vyskytující se v menším množství (3–10 %). Tvoří součást buněčné stěny, nacházejí se v lumenu anatomických elementů i mezibuněčných prostorech. Mají vliv na barvu, vůni dřeva, ale také i na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, jakožto opracování, sušení, trvanlivost, impregnaci apod. (Šlezingerová et al. 2008).

Tab. 2 Procentuální podíl hlavních chemických složek v kmeni stromu smrku ztepilého (Athanassiadis a Räsänen 2013)

Chemické složení dřeva	
Celulóza	42,0 %
Hemicelulózy	27,3 %
Lignin	27,4 %
Extraktivní látky	2,0 %

3.1.4 Využití smrkové dřeva v praxi

Smrk se řadí mezi naše nejdůležitější užitkové dřevo v ČR, a proto je významnou oporou dřevařského průmyslu. Zpracovává se na výrobu řeziva, papíru i paliva, poskytuje dřevo stavební a truhlářské. Mezi jehličnany má nevyšší podíl při výrobě dřevěných stavebních konstrukcí, telekomunikačních sloupů, sloupů pro chmelnicové konstrukce, viniční kůly a palisády. Dobře rostlé smrky zvláštních kvalit z vybraných lokalit se zpracovávají na rezonanční dřevo, které svými vlastnostmi slouží pro výrobu hudebních nástrojů. Pyskyřice se dříve zpracovávala na bednářskou smůlu (terpentýn) a kůra sloužila pro výrobu třísla (Úradníček a Chmelař 1998, Reinprecht 2008, <http://www.impregnacesobeslav.cz>).

3.1.5 Přírozená trvanlivost smrkového dřeva

Přírozená trvanlivost dřeva je jeho schopnost odolávat napadení a destruování především proti biotickým škůdcům (houby, plísně, hmyz, cizopasně rostliny), tak i abiotickým činitelům (oheň, povětrnost, záření atd.). Odolnost jednotlivých dřevin je dána jeho anatomickou strukturou a chemickým složením dřeva (Baier a Týn 2001).

Podle Šefců et al. (2000) se dřevo může zdát jako materiál s nízkou životností v porovnání s jinými materiály (např. zdivo), ale ve skutečnosti tomu tak není, pokud tento materiál používáme ve vhodných podmínkách. Faktory, které nejvíce ovlivňují trvanlivost dřeva a jeho odolnost vůči napadení:

- Prostředí, zejména vlhkost, přítomnost vzduchu a teplota
- Druh dřeva
- Kvalita dřeva (bez vad)
- Konzervační a ochranné látky (např. impregnace chemických látek)

Pro jednotlivé dřeviny se trvanlivost zkouší metodami popsány v příslušných evropských normách a naměřené hodnoty se porovnávají s výsledky referenčních dřevin. Na základě zkušebních výsledků se přirozená trvanlivost konkrétní dřeviny proti napadení biotickými škůdci klasifikuje:

- Pěti třídami u napadení houbami
- Třemi třídami u napadení dřevokazným hmyzem
- Třemi třídami u napadení termity a mořskými škůdci (v tuzemsku se nevyskytují)

(<http://drevari.humlak.cz/>)

Klasifikace přirozené trvanlivosti smrku ztepilého je stanovena dle normy ČSN EN 350-1 *Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Část 1: Návod na zkoušení a klasifikaci přirozené trvanlivosti dřeva*. Smrk ztepilý se podle normy řadí do 4 třídy jako slabě trvanlivé.

Reinprecht (2010) se zabýval přirozenou trvanlivostí dřeva na vzorcích přes 75 let starého smrku ztepilého (*Picea abies*), které byly vystaveny působení houby hnědého tlení *Coniophora puteana*, při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti 70–80 % po dobu 2 až 12 týdnů. Z výsledků a ČSN EN 350-1 vyplynulo, že přirozená trvanlivost smrkového dřeva vůči působení dané houby je klasifikována jako slabě trvanlivá (horší). Úbytek dřevní hmoty napadených vzorků během 2 až 12 týdnů byl v rozsahu 0,48–28,11 % s poklesem hustoty v rozmezí 0,73–21,48 %.

3.2 Impregnace dřeva

Impregnaci dřeva můžeme nazvat jako zavedení chemické látky do struktury dřeva, se záměrem zlepšit jeho vlastnosti. Dokáže stabilizovat rozměry dřeva, zvýšit pevnost i odolnost proti vodě a vlhkosti, minimalizovat vznik trhlin a další. Musí se použít vhodný způsob impregnace a typ chemické látky jako ochranný prostředek s fungicidními, insekticidními, ohnivzdornými a protiplísňovými vlastnostmi. (Baraks a Nikiforov 1969, Baier a Týn 2001).

Funkční životnost neošetřeného dřeva v interiéru se za příznivých podmínek odhaduje až na 200 let. V prostředí se zvýšenou vlhkostí a teplotou se tyto podmínky mění a zvyšuje se pravděpodobnost napadení biotickými škůdci, což životnost dřeva razantně snižuje (2–5 let). Použitím správné impregnace je možnost prodloužit životnost u takto ošetřených prvků až na 20 let a více (Paserin 1970, Baier a Týn 2001).

3.2.1 Klasifikace impregnovatelnosti

Klasifikace impregnovatelnosti jednotlivých dřevin se určuje především u jádrového dřeva, které je určeno jako trvanlivé, zatímco bělové dřevo je považováno za netrvanlivé. Při tlakové impregnaci můžeme běl proimpregnovat až do hloubky několik cm, jádru jen do hloubky několika mm. Při tlakových impregnacích se používají impregnační ochranné látky na bázi pro jejich dobrou fixaci na dřevo. Smrkové dřevo řadíme do 4. třídy jako extrémně obtížně impregnovatelné, viz. Tab. 3 (Ptáček 2009).

Tab. 3 Klasifikace impregnovatelnosti dřeva dle ČSN EN 350-2

Třída impregnovatelnosti	Popis	Vysvětlivky
1	Impregnuje se lehce	Řezivo lze úplně proimpregnovat tlakovou impregnací
2	Impregnuje se středně obtížně	Úplný průnik obvykle není možný, ale po 2 nebo 3 hod. tlakové impregnace lze dosáhnout u jehličnatých dřevin více než 6 mm bočního průniku a u listnatých pronikne velkou částí cév
3	Impregnuje se obtížně	Po 3 až 4 h tlakové impregnace nelze dosáhnout více než 3 až 6 mm bočního průniku
4	Impregnuje se extrémně obtížně	Značně nepropustné pro impregnaci, průnik ochranného prostředku i po 3 až 4 h tlakové impregnace, jak boční, tak čelní je minimální

3.2.2 Chemické složení ochranné látky

Volba vhodné impregnační látky závisí především na podmínkách, ve kterých bude dřevo dlouhodobě umístěno a vystaveno okolním vlivům. V našem případě se jednalo o látky založené na bázi anorganických solí, nevyluhovatelné ze dřeva vodou. Účinnými složkami jsou převážně kombinace solí mědi a sloučeniny bóru. Ochranné prostředky s podílem mědi a bóru mají vysokou účinnost proti všem biotickým škůdcům (dřevokazným houbám *Basidiomycetes*, včetně hub způsobujících měkkou hnilobu, dřevokaznému hmyzu, dřevo-zbarvujícím houbám i plísním). Jedná se o přípravky, které se fixují chemickou reakcí na dřevní hmotu (po fixaci dojde k zamezení vyluhovatelnosti z impregnovaného materiálu). Používají se k ochraně dřeva především v exteriéru staveb, kde hrozí vzlínání vlhkosti ze země (pozednice, podlahové trámy apod.), včetně dřeva zabudovaného do země a v kontaktu se sladkou vodou (třídy ohrožení 3, 4 dle ČSN EN 335-1,2). Tyto prostředky jsou určeny výhradně pro průmyslovou impregnaci vakuovými a tlakovými způsoby (<http://drevari.humlak.cz/>).

3.2.3 Metody impregnace dřeva

Existuje mnoho technik a aplikací, které zajišťují transport chemické látky do ošetřovaného dřeva v požadovaném množství. Volba impregnačních technik závisí na vlastnostech dřeva (druh, propustnost, vlhkost aj.), ochranné látce, konečném využití impregnovaného materiálu (použitá třída, zdravotní rizika aj.) a v neposlední řadě záleží na technice, která je k dispozici (Pařil 2016).

3.2.3.1 Technologie povrchového ošetření dřeva

Tyto metody jsou závislé na kvalitě povrchu (drsnoti), ploše, rozdílných koncentracích a kapilárního tlaku ve dřevě.

Nátěr, nános a postřik jsou jednoduché způsoby impregnace s nízkými náklady a velmi omezenou hloubkou průniku. Uplatnění u výrobků vystavených v málo náročných expozicích (např. prvky stropů a krovů).

Ponoření a máčení zahrnuje ponoření dřeva do ochranné látky po krátkou dobu (pár min), zatímco máčení se vztahuje na několik hodin či dní.

Difuzní metoda se aplikuje na čerstvě pokácené řezivo s obsahem vlhkosti vyšším než 50 % (např. sloupy nebo stavební materiál). Vodou ředitelné látky (soli boru, sloučeniny fluoru) se ve formě pasty nanášou kartáčem na povrch dřeva, kde se šíří

především do bělové části dřeva. Během difuze je průtok látky zajištěn koncentračním gradientem materiálu, který vytváří hybnou sílu a způsobuje pohyb roztoku z místa s vyšší koncentrací na místa s nižší koncentrací.

Teplá a studená lázně je fyzikální metoda impregnace, kdy se dřevo namočí do horké konzervační lázně po dobu několika hodin. Vzduch v buněčných dutinách dřeva postupně expanduje. Konzervační látka proniká do dřeva v důsledku podtlaku, který je vytvořen při kontrakci vzduchu po ponoření do studené lázně (Mechanical Wood Products Branch 1986, Reinprecht 2008, Pařil 2016).

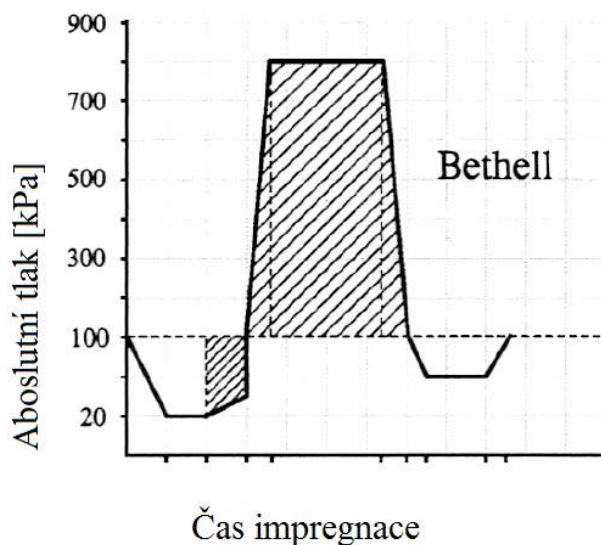
Beztlakové impregnace nejsou vhodné pro sanační ochranu dřeva chemickými látkami, protože nedokážou zabezpečit dostatečnou hloubku průniku, která by ochránila dřevo před degradací dřevokazným hmyzem a dřevokaznými houbami.

3.2.3.2 Technologie hloubkové impregnace dřeva

Impregnace kombinující vakuum a tlak jsou nejobvyklejší a nejúčinnější metody. Používají se na chemickou ochranu dřevařských výrobků určených do náročnějších expozicích (železniční pražce, telekomunikační sloupy, elektrorozvodné sloupy, palisády, prvky stavebních konstrukcí a další). Existuje celá řada tlakových procesů, z nichž všechny využívají stejný obecný princip, ale liší se v detailech aplikace. Můžeme je rozdělit na metody plných buněk (Bethell) a prázdných buněk (Lowry a Rüping) (McClean 1953).

Bethell proces – „metoda plného nasycení buněk dřeva“

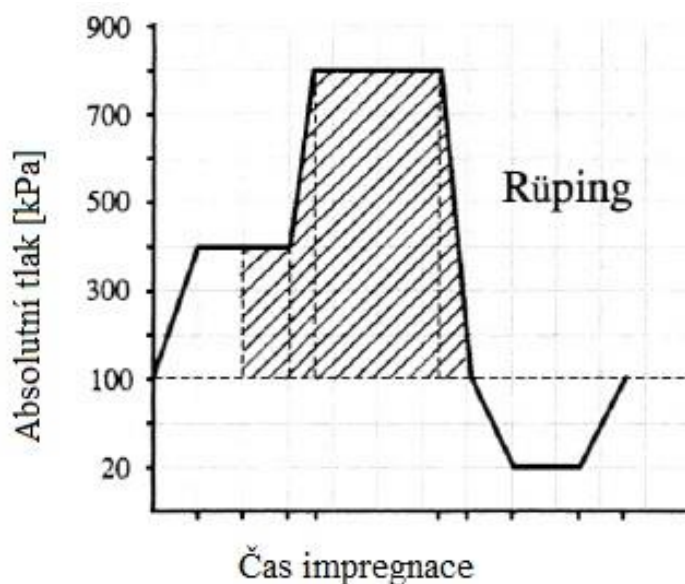
Při impregnaci je záměrem dostat co nejvíce ochranné látky do dřeva za působení přetlaku po určitou dobu (Obr. 4). Impregnované dřevo je uzavřeno v impregnačním válci. Nejprve je vytvořeno počáteční vakuum, které slouží k odstranění vzduchu z buněčných stěn a mezer. Po několika minutách se do impregnačního válce pustí roztok chemické látky, která začne pronikat do struktury dřeva. Následně dojde k vytvoření přetlaku, který se udržuje několik hodin podle propustnosti a průřezu materiálu, dokud ochranná látka nepronikne do všech mezer dřevní hmoty. Při vypouštění impregnační látky se ke konci vytvoří podtlak, kvůli zabránění ronění látky z povrchu ošetřeného dřeva (Hafýzořlu 1987, Pařil 2016). Bethell se používá pro těžko impregnovatelné dřeviny jako jsou smrk, jedle, jádro buku či dubu aj. Nevýhodou je vysoká spotřeba impregnační látky, jelikož dochází k plnému nasycení buněk dřeva (Svatoň 2000, Reinprecht 2008). Tento způsob impregnace a jeho následná modifikace bude více rozveden a upřesněn v kapitole č. 4 – Materiál, metodika a příprava měření.



Obr. 4 Diagram technologického postupu impregnace metodou Bethell (upraveno dle Reinprecht 2008)

Rüping proces – „metoda prázdných buněk“

V porovnání s metodou plného nasycení buněk se Rüpingova metoda liší v počáteční fázi, kdy není použito vakuum nýbrž přetlak. Cílem je zvýšit tlak vzduchu v lumenu buněk dřeva. Po několika minutách se vpustí impregnační látka a zvýší se tlak podle diagramu na Obr. 5. Na konci se opět vytvoří vakuum. Využití nachází u lehce impregnovatelného dřeva, jedná se o ekonomický způsob impregnace až s poloviční spotřebou ochranné látky (Reinprecht 2008, Pařil 2016).



Obr. 5 Diagram technologického postupu impregnace metodou Rüping (upraveno dle Reinprecht 2008).

3.2.4 Způsob modifikace impregnačního procesu

Úpravou modifikace se zabývali Melcher a Zwiefelhofer (2013), kteří prováděli experiment, jehož cílem bylo zjištění závislosti času na příjmu tekutiny u jádra šesti dřevin při použití dvou odlišných režimů vakuově-přetlakové impregnace. Mezi zkoumané dřeviny byl vybrán smrk, borovice, jedle, douglaska, dub a akát. U poloviny vzorků se zatřela čela epoxidovou pryskyřicí kvůli zamezení pronikání ochranné látky v podélném směru. Impregnační látkou byl roztok 1 % kyseliny borité. Impregnace proběhla ve dvou rozdílných cyklech:

- A. Krátkodobý proces (STP) - trvající dvě hodiny, založený na dvou krocích.
 - 30 min podtlak (přibližně 10 kPa)
 - 90 min přetlak (přibližně 800 kPa)
- B. Dlouhodobý proces (LTP) - trvající 24 hodin, složený ze 6 kroků.
 - 3krát STP
 - 30 min podtlak (přibližně 10 kPa)
 - 15,5 hod přetlak (800 kPa)
 - Závěrečný STP

Po provedení této studie bylo zjištěno, že dlouhodobý proces impregnace má pozitivní vliv na příjem impregnační látky. Pro vzorky smrku, douglasky, borovice a dubu, které jsou klasifikovány dle ČSN EN 350-2 do 3. a 4. třídy impregnovatelnosti (viz. kap 3.2.1), bylo potvrzeno, že vzorky se zatřenými čely epoxidovou pryskyřicí přijmuly menší množství ochranné látky než vzorky nezatřené. Nezatřené vzorky JD prokázaly až 3krát vyšší příjem látky u STP než ostatní dřeviny, přestože je JD zařazena do 2. až 3. třídy. Jediný AK vykazoval stejné příjmy jak u zatřených, tak i nezatřených vzorků (Tab. 4).

Tab. 4 Příjem látky u zatřených a nezatřených vzorků závisující na impregnačním procesu

	Absorpce roztoku kyseliny borité (kg/m ³)			
	Nezatřené vzorky		Zatřené vzorky	
	STP	LTP	STP	LTP
SM	167	479	104	308
BO	204	577	83	540
DB	210	494	145	368
JD	624	738	308	738
DG	255	520	172	306
AK	33	118	32	114

3.3 Vybrané vlastnosti dřeva ovlivňující impregnovatelnost

3.3.1 Vlhkost dřeva

Jádro (vyzrálé dřevo) smrku má 3–4krát menší vlhkost než běl. Průměrná roční vlhkost vyzrálého dřeva je 33–38 %, zatímco vlhkost běle je 112–132 % (Horáček 2008). Vlhkost dřeva ovlivňuje množství příjmu impregnační látky, tento vliv je závislý na impregnačním procesu a impregnační látce. Při zpracování se z technologického hlediska používá dřevo vysušené na určitou vlhkost. Během procesu sušení však dochází u jehličnatých dřevin k uzavírání dvojteček, tudíž i zamezení propojení jednotlivých tracheid ve dřevě. Nejčastěji se dvojtečky u smrku uzavírají při poklesu vlhkosti pod mez hygroscopicity (Požgaj 1997, Svatoň 2000).

Totéž uvádí i Pánek et al. (2013), který píše, že všechny dvojtečky u smrku jsou uzavřeny při snížení vlhkosti na 30 %, což je blízko bodu nasycení vláken (BNV). Z tohoto důvodu jsou vysušené výrobky z bělového a jádrového smrkového dřeva prakticky nepropustné pro kapaliny a chemicky ochranné látky.

Vlhkost dřeva při použití tlakových impregnací se stanovuje v rozmezí 30–40 %.

3.3.2 Pohyb vody ve dřevě

Tekutiny (kapaliny a plyny) se ve dřevě pohybují dvěma základními způsoby, objemovým tokem a molekulárním tokem. Objemový tok probíhá v mezo- a makrokapilárách pod vlivem gradientu statického nebo kapilárního tlaku. Molekulární tok zahrnuje pohyb plynů v lumenech buněk přes ztenčeniny buněčných stěn a pohyb vody vázané v mikrokapilárách buněčné stěny. Praktickou aplikací objemového toku je tlaková impregnace ochranných látek do dřeva. Velikost objemového toku dřevem je dána jeho propustností. Aplikací molekulárního toku je sušení dřeva a pohyb vlhkostního pole dřevěným prvkem při vyrovnávání rovnovážné vlhkosti dřeva. Molekulární tok látek popisujeme difúzí (Horáček 2008).

3.3.3 Pórovitost dřeva

Pórovitost dřeva vyjadřuje objem pórů v jednotkovém objemu suchého dřeva. Póry jsou tvořeny mezibuněčnými prostory, lumeny a kapilárním systémem v buněčných stěnách. U našich dřevin se pórovitost pohybuje v rozmezí 40–80 %. Pórovitost dřeva udává informace o důležitých aspektech stavby dřeva a přispívá k pochopení těch vlastností, které závisí na pórovité struktuře dřeva – propustnosti a difuzi vody ve dřevě.

Z technologického hlediska má velký význam při procesu impregnace, sušení a povrchové úpravě dřeva (Šlezingerová et al. 2009).

3.3.4 Propustnost / impregnovatelnost dřeva

Propustnost je objemový tok tekutin přes látku (dřevo) vyvolaný gradientem vnějšího tlaku. Tento proces označujeme jako hydrodynamický pohyb. Měřítkem propustnosti může být pórovitost dřeva, která určuje obtížnost toku tekutin (impregnační látky) přes dřevo za přítomnosti gradientu tlaku. K propustnosti látky pro tekutiny nestačí jen její pórovitost. Podmínkou je spojení volných prostor do kapilárního systému, u dřeva propojení lumenů buněk perforovaných přehrádkami cév, ztenčeninami buněčných stěn nebo křížovými poli dřeňových paprsků. Pod vodivými cestami rozumíme makrokapiláry a mikrokapiláry o poloměru větším než 10^{-7} m, kterými se pohybuje voda volná (Šlezingerová a Gandelová 2002, Horáček 2008).

Velmi nízká propustnost jehličnatých dřevin má za následek problémy během sušících procesů, problémy s vařením, pařením a impregnací ochranných látek (Kurjatko a Reinprecht 1993).

Faktory ovlivňující propustnost dřeva

Propustnost dřeva závisí především na geometrické, morfologické a převážně anatomické stavbě dřeva (rozměrech elementů dřeva, struktuře a velikosti ztenčenin v buněčné stěně, propustnosti jednotlivých anatomických elementů), anatomickém směru, hustotě, vlhkosti dřeva a předcházejícímu sušení dřeva. Dřevo jehličnanů je hůře propustnější než dřevo listnáčů, rozdíl je především způsoben přítomností cév (Horáček 2008, Pánek et al. 2013).

Důležitou roli při propustnosti hrají především tečky a dvojtečky. Ochranná látka může pronikat do dřeva jedině tehdy, jsou-li dvojtečky otevřené, a to je především u čerstvě pokáceného dřeva. Propustnost v jarním a letním letokruhu smrkového dřeva je rozdílná (Svatoň 2000).

Pánek et al. (2013) taktéž uvádějí, že otevřený nebo uzavřený stav dvojteček v tracheidách má dominantní vliv na propustnost jehličnanů (Obr. 3). Ve smrkovém dřevě dochází během růstu (v jádrové části) nebo v průběhu sušení dřeva po jeho skácení (v bělové části) k postupné aspiraci ztenčenin buněčné stěny.

Lehringer (2011) se zabíral problematikou propustnosti dřeva pomocí biologické úpravy. Ve svém experimentu popisuje zvýšení propustnosti smrku ztepilého pomocí

působení houby bílého tlení *Physisporinus vitreus*. Metoda je založena na růstu houbových hyf přes tracheidy a parenchymatické buňky. Tato houba zde degraduje ztenčeniny buněčných stěn již po 6 týdnech inkubace a výrazně zvýší impregnovatelnost kapalných látek, při zanedbatelné ztrátě mechanických vlastností.

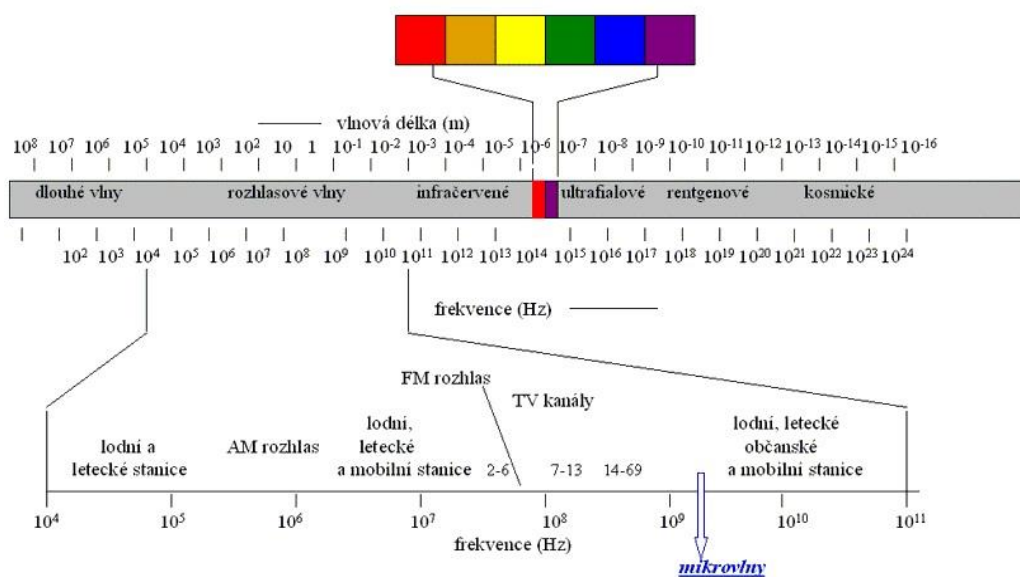
Pánek a Reinprecht (2011) se společně zabývali metodou enzymatického rozkladu pro zvýšení permeability smrkového dřeva. Ve své práci popisují rozklad ztenčenin buněčných stěn u tracheid smrkového dřeva. Použitá bakterie *Bacillus subtilis* produkuje potřebné enzymy, které již po pár týdnech znatelně zvyšují propustnost dřeva.

Tato práce se ovšem zabývá možnou úpravou propustnosti dřeva před jeho impregnačí pomocí mikrovlnného záření, které je popsáno v následující kapitole.

3.4 Mikrovlnná modifikace pro zvýšení propustnosti dřeva

3.4.1 Mikrovlny obecně

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny, které zauímají v elektromagnetickém spektru oblast na konci rádiových vln, což znamená, že z jedné strany jsou ohraničeny pásmem velmi krátkých rádiových vln a z druhé strany infračerveným zářením. Jedná se o frekvenci od 300 MHz do 300GHz odpovídající vlnovým délkám λ od 1 m do 1 mm viz. Obr. 6. Pro průmyslové aplikace se používá především frekvence 2 450 MHz o vlnové délce 12,2 cm, díky čemu nemohou mikrovlny unikat malými otvory, jako je např. mřížka na dvířkách (Hájek 2008).



Obr. 6 Elektromagnetické spektrum (<http://www.mykos.cz/bezpecnost-mikrovlny/>)

Mikrovltná zařízení mohou pracovat pouze s určitými frekvencemi, jako je například již zmíněná frekvence 2,45 GHz. Tato frekvence je celosvětově používána, a to hned ze dvou důvodů. V prvním případě při použití dochází k absorpci mikrovltné energie v polárních molekulách, na které energie působí, kdy nejčastějším zástupcem polární molekuly je molekula vody, kterou můžeme objevit ve dřevě ve všech jejich skupenství. V druhém případě použití mikrovltného záření nedochází k rušení telekomunikačního vysílání (televizní vysílání, navigace letadel atd.), (Scháněl 2003, Nesswetrova a Nikl 2011).

3.4.2 Mikrovltný ohřev

Princip mikrovltného ohřevu spočívá v interakci elektromagnetického záření s polárními látkami (např. voda ve dřevě). Za normálního stavu jsou molekuly vody neuspořádané, díky působení mikrovltného záření dochází v elektromagnetickém poli k jejich rozkmitání a následné orientaci dle polarity (kladná část k zápornému pólu a záporná část ke kladnému pólu). Při použití mikrovltného záření o frekvenci 2 450 MHz se polarita elektromagnetického pole mění více než 10^9 krát za sekundu, což způsobuje vibraci a následně rozkmitání molekul, které do sebe začnou narážet (dochází ke tření). Tímto se mikrovltná energie začne přeměňovat na teplo, dochází k vypařování vody (Scháněl 2003).

3.4.3 Autoři zabývající se vlivem mikrovltné modifikace na změnu propustnosti dřeva

Torgovnikov a Vinden (2008 a 2009) se zabývali mikrovltnou úpravou dřeva BO, SM, DG, DB a Eukalyptu. Jejich experiment prokázal výrazné zvýšení propustnosti pro kapalinu a plyny při frekvencích 0,922 a 2,45 GHz.

Princip mikrovltného zvýšení propustnosti je založen na vzniku tlaku vodní páry, který je schopen delaminovat buněčné stěny (Yu et al. 2011).

Ve dřevní struktuře se poté vytvářejí mikro a makro trhliny (v závislosti na intenzitě záření), které ovlivňují i jiné vlastnosti dřeva jako jsou například snížení mechanických vlastností a zvětšení objemu (Torgovnikov a Vinden 2009).

Dle Torgovnikova a Vindena (2004) a Yu et al. (2011) vznikají trhliny převážně v dřevných paprscích, protože mají tenčí buněčné stěny než ostatní elementy dřeva a při působení vysokého tlaku vodních par, může dojít k narušení vodivých cest.

Tento fakt můžeme pozorovat z experimentu Torgovnikova a Vindena (2006), kteří naměřili zvýšené hodnoty propustnosti v radiálním směru u modifikovaných prachů borovice paprsčité.

Prostupnost v axiálním a radiálním směru může stoupnout až tisícinásobně i u dřevin, které jsou málo propustné až nepropustné pro kapaliny i plyny (Torgovnikov a Vinden 2004).

Treu et. al. (2008) upravovali vzorky jádra smrku ztepilého (*Picea abies*) a borovice lesní (*Pinus sylvestris*) s cílem zvýšit jejich impregnovatelnost. V kontinuálním zařízení s výkonem 6 kW a frekvencí 2,45 GHz ozařovali vzorky v krátkodobých až 14 sekundových intervalech opakujících se maximálně 7krát. Výsledky ukazují, po jednom i více intervalech ozařování, téměř nulové rozdíly v příjmu vody ve srovnání s příjmem neošetřených vzorků.

Torgovnikov a Vinden (2008) se zabývali experimentálním nastavením intenzity mikrovlnného záření u dřeva Eukalyptu. Výsledkem jejich práce bylo rozdělení záření do tří úrovní: nízká, střední a vysoká. Nízká úroveň nabízí 1,1 až 1,5krát zvýšenou propustnost dřeva. Střední úroveň zvyšuje propustnost až tisíckrát a vysoká úroveň modifikuje strukturu dřeva do podoby porézního materiálu.

Reinprecht et al. (2010) zkoumali impregnovatelnost bělí smrku ztepilého po mikrovlnné úpravě. MW modifikace se prováděla o frekvenci 2,45 GHz a výkonu 500 W při různých časech ozařování, a to v rozmezí 2 až 24 minut. Modifikované vzorky byly ve dvou skupinách, první skupina $w = 160\text{--}195\%$ a druhá byla prvně vysušena na $w = 8\%$ a následně nasycena na $w = 80\text{--}90\%$. Výsledky popisují, že první skupina vzorků s vysokou vlhkostí vykazuje značně zvýšenou impregnovatelnost než vzorky, které byly před MW úpravou vysušeny a následně nasyceny.

Torgovnikov a Vinden (2010) poukazují na komerční využití mikrovlnné úpravy dřeva, kde uvádějí možnost použití aplikace pro zvýšení propustnosti řeziva, kulatiny, železničních prachů, sloupů, mostních konstrukcí a mnoho dalších.

3.5 Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo má nenahraditelné vlastnosti, díky kterým má široké uplatnění v praxi. Mezi tyto vlastnosti patří zejména mechanické vlastnosti. Díky mikrovlnné modifikaci a následné impregnaci smrkového dřeva rozdílnými procesy je možné, že dojde ke změně těchto vlastností.

Mechanické vlastnosti charakterizují schopnost dřeva odolávat účinkům vnějších sil. Tyto síly deformují dřevo v závislosti na odporu jeho vnitřní struktury a výsledkem tohoto procesu jsou dočasné nebo trvalé změny tvaru dřeva (Požgaj et al. 1997).

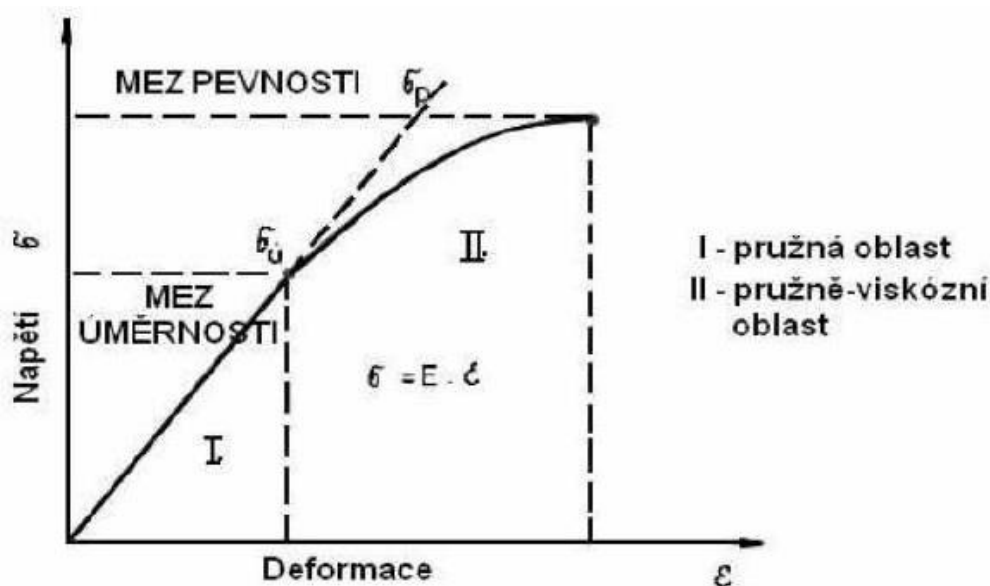
3.5.1 Napětí a deformace dřeva

Napětí ve dřevě definuje míru vnitřních sil, které vznikají v tělese jako výsledek vyvolaný vnějšími mechanickými silami. Napětí je výslednicí poměru diferenciální síly a plochy namáhaného průřezu. Je-li rozložení síly na plochu rovnoměrné, vyjadřujeme napětí jako prostý podíl síly a plochy. Napětí ve dřevě dělíme podle směrů působení vnějších sil. Jestliže síly působí kolmo na průřezovou plochu tělesa, způsobí normálové napětí (σ). Působí-li síly v rovině průřezové plochy daného tělesa, vzniká tangenciální (tzv. smykové) napětí (τ).

Deformace (ε) se definuje jako změna tvaru a rozměru dřeva vyvolaná působením mechanických sil. Po kvalitativní stránce rozdělujeme deformace dřeva na:

- Pružné deformace (ε_p)
- Deformace pružné v čase (ε_ε)
- Plastické deformace (ε_{pl})

Korelaci mezi napětím a deformací dřeva můžeme vyjádřit empirickou křivkou nazývanou pracovní diagram (Obr. 7). Pracovní diagram lze rozdělit na dvě základní části, a to na lineární část po mez úměrnosti a nelineární část od meze úměrnosti po mez pevnosti. Mez úměrnosti určuje horní hranici napětí, při kterém vznikají ve dřevě pouze pružné deformace (tzn. po uvolnění síly se těleso dostane do původního stavu). V úseku od meze úměrnosti po mez pevnosti vznikají deformace nejen pružné a pružné v čase, ale i deformace plastické, které jsou nevratné (Požgaj et al. 1997).



Obr. 7 Pracovní diagram napětí a deformace dřeva (upraveno dle Požgaj et al. 1997)

3.5.1.1 Pevnost dřeva v tlaku podél vláken

Nejvýznamnější a nejcharakterističtější tlakovou pevností v porovnání s ostatními směry zatížení je pevnost podél vláken. Z výsledků tlakové zkoušky lze velmi dobře usuzovat na ostatní pevnostní vlastnosti materiálu. Odtud plyne značný význam této zkoušky pro posouzení únosnosti nejrozmanitějších dřevěných konstrukcí, tedy pro reálnou použitelnost materiálu v technické praxi. Pro jednoduchost zatížení a poměrně vysokou pevnost má tlak rovnoběžně s vlákny široké praktické uplatnění (Lukášek 2012).

Působením vnější síly (tlaku) na těleso podél vláken dojde k deformaci, projevující se zkrácením délky tělesa. Charakter deformace závisí na jakosti a stavbě daného dřeva. Důležitými činiteli jsou hustota a vlhkost. U dřeva s vysokou hustotou, a tím i vysokou pevností, vzniká zatížením porušení dřeva ve formě smyku, kdežto u dřev s nízkou hustotou a malou pevností dochází k otláčení vláken na čelních plochách a k vybočení stěn zatěžovaného tělesa. U jehličnatých dřevin, v zóně porušení, nastávají změny v mikroskopické stavbě jednotlivých elementů, zejména v tracheidách, následně se deformuje buněčná stěna a celá vlákna. Mez pevnosti je nejvyšší hodnota napětí, které dřevo snese bez porušení celistvosti tělesa. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku podél vláken u dřev s vlhkostí 12 % je cca 50 MPa (Gandelová et al. 2002, Horáček 2008). V Tab. 5 je souhrn meze pevnosti smrku různými autory.

3.5.1.2 Pružnost dřeva v tlaku podél vláken

Pružnost dřeva je schopnost materiálu odolávat deformacím a nabývat počáteční tvar a rozměry po přerušení působení vnějších sil (Matovič 1993).

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace. Jeho průměrná hodnota pro dřevo v tlaku ve směru vláken pro naše domácí dřeviny se udává v rozpětí 10 000–15 000 MPa při průměrné vlhkosti 12 %. Napříč vlákny je tato hodnota až 25krát menší, přičemž v radiálním směru je až o 50 % vyšší než ve směru tangenciálním (Horáček 2008, Požgaj et al. 1997). V Tab. 5 je výpis modulu pružnosti od různých autorů.

Tab. 5 Mez pevnosti (MOR) a modul pružnosti (MOE) smrku ztepilého v tlaku ve směru vláken podle rozdílných autorů

Literatura	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
	Tlak podél vláken při w = 12 %	
Heikkonen et al. (2007)	45	13 700
Kollmann a Cote (1968)	-	11 000
Požgaj et al. (1997)	34,1	13 650
Ugolev (1975)	44,4	-
Ugolev (1986)	-	14 300
Kollmann (1951)	51,28	-
Lavers (1993)	51,28	-
Wagenführ (2000)	45,5	-

4 Materiál, metodika a příprava měření

V části této práce bude podrobně popsána výroba zkušebních vzorků pro jednotlivé operace, zvolená metodika mikrovlnné modifikace pro zvýšení permeability smrkového dřeva a následná modifikace impregnační metody Bethell a dalších potřebných prací pro tuto studii.

4.1 Použitá zařízení a pomůcky v laboratoři

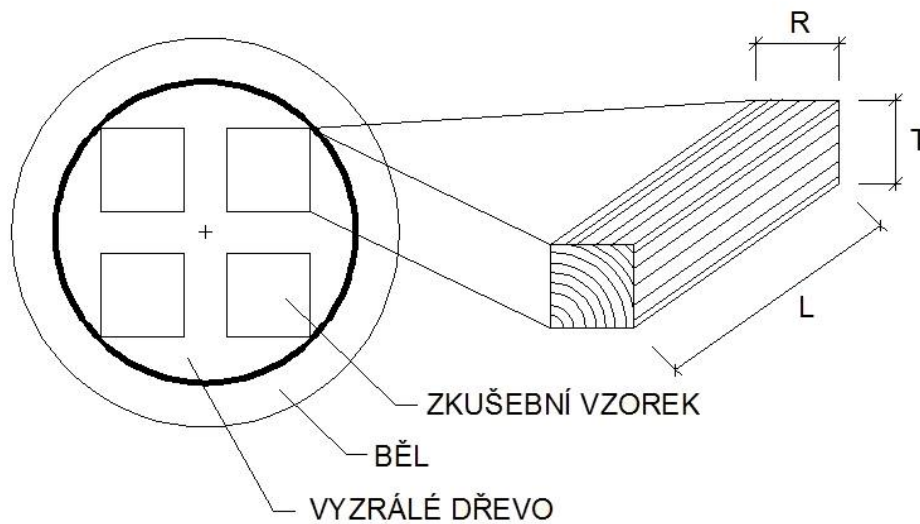
- Horizontální pásová pila, formátovací pila, srovnávací frézka
- Mikrovlnná linka od firmy Romill
- Vakuově tlaková impregnační linka typu JHP 1-0072
- Klimatizační zařízení Klimabox Sanyo MHT
- Vlhkoměr Tramex MRH III.
- Digitální laboratorní váha Scaltec (vážení s přesností na 0,001 g)
- Digitální posuvné měřítko MITUTOYO Absolute (s přesností na 0,01 mm)
- Univerzální zkušební stroj ZWICK Z 050
- Exsikátor, kádinky

4.2 Zkušební vzorky

4.2.1 Výroba zkušebních vzorků

Pro výrobu vzorků byla použita metrová kulatina smrku ztepilého (*Picea abies*) o průměru 25–35 cm, získaná vyřezáním z oddenkové části kmene vzdálené 1 metr od povrchu země. Celkem se zpracovalo pět výřezů z pěti různých kmenů podle vytvořeného schématu, viz Obr. 8.

V první řadě se kulatina musela zbavit kůry pomocí pořizu, horizontální pásovou pilou rozřezat na fošny o tl. 50 mm (Obr. 9). Na kotoučové formátovací pile byla oddělena bělová část dřeva od vyzrálé části, která se vyznačila hned po skácení stromu, kdy byla zřetelně ohraničená černou fixou. Fošny byly rozřezány na hranolky o tl. 50 × 50 × 300 mm, následně opracovány srovnávací frézku pro dosažení hladkého povrchu a požadovaných rozměrů 45 × 45 × 300 mm (R × T × L). Rozměry zkušebních vzorků byly stanoveny s ohledem na technické parametry mikrovlnného zařízení a impregnační linky.



Obr. 8 Schéma výběru a způsobu vymanipulování zkušebních těles ze smrkového výřezu

Z každého metrového výřezu se podařilo vymanipulovat cca 12 hranolků, celkem tedy 60 ks. Byly vybrány vzorky bez jakéhokoliv mechanického a biotického poškození nebo jiných viditelných vad dřeva, jež by mohly ovlivnit výsledky zkoušek, jako například trhliny, suky, pryskyřice, odklon vláken, reakční dřevo atd.



Obr. 9 Rozřezávání jednotlivých výřezů na fošny horizontální pásovou pilou

4.2.2 Stanovení skupin vzorků a jejich označení

Vybrané vzorky se roztřídily na hromádky podle jednotlivých výřezů, ze kterých byly vymanipulovány. Z každého výřezu byly vzorky rozděleny do pěti skupin. Tab. 6 poskytne lepší přehlednost stanovení vzorků do dílčích skupin.

Tab. 6 Roztřídění vzorků do jednotlivých skupin podle způsobu modifikace

	Mikrovlnný režim	Režim impregnace	Značení vzorků	
			Kmen	Sada
MW modifikace	2 kW	SP	1	1, 2
	3 kW	SP	1	3, 4
IMP modifikace	-	SP	1	5, 6
	-	LP	1	7, 8
Referenční vzorky	-	-	REF	

Celkové rozdělení skupin vzorků získaných z pěti různých výřezů s počtem připravených vzorků:

1. Mikrovlnné záření o výkonu 2 kW + „short process“ impregnace (10ks)
2. Mikrovlnné záření o výkonu 3 kW + „short process“ impregnace (10ks)
3. „Short process“ impregnace (10ks)
4. „Long process“ impregnace (10ks)
5. Referenční vzorky (nemodifikované), (17ks)

4.3 Předúprava vzorků mikrovlnnou modifikací

Mikrovlnné zařízení (Obr. 10) se nachází ve Výzkumném centru v Útěchově. Tento prototyp slouží k úpravě vlastností dřeva a ke kontinuálnímu sušení. Vlastní linka se skládá z pásového dopravníku, modifikační komory, vlnovodu, „magického T“ a mikrovlnného generátoru. Mikrovlnný generátor disponuje regulovatelným výkonem 0 až 6 kW, což umožňuje použít velmi šetrné režimy sušení, ale na druhé straně i tvrdé režimy modifikace. Při vysokých výkonech je linka schopná docílit termického rozkladu dřeva i roztrhání dřevní struktury přetlakem vodní páry.



Obr. 10 Laboratoř vybavena mikrovlnou linkou od firmy Romill, Výzkumné centru v Útěchově

Příprava zkušebních vzorků

Vybrané zkušební vzorky k modifikaci byly rozděleny do 2 skupin. Díky nízké vlhkosti vyztřáleného dřeva u smrku (viz kap. 3.3.1), nebylo potřeba vzorky nijak sušit či klimatizovat. Před začátkem modifikace se pro kontrolu dielektricky zjistila vlhkost vzorků pomocí vlhkoměru, která se pohybovala v rozmezí 33–38 % a následně proběhlo jejich vážení na laboratorní váze (s přesností na 0,001 g) za účelem zjišťování úbytku vlhkosti během mikrovlnné úpravy.

Předběžná zkouška pro stanovení vhodné intenzity mikrovlnného záření

Před začátkem vlastního experimentu bylo potřeba zvolit vhodné režimy nastavených výkonů mikrovlnného záření a také vhodný posuv rychlosti dopravníku mikrovlnné linky pro zkušební vzorky. Pro zajištění vhodných podmínek bylo vyrobeno několik vzorků smrkového dřeva, které sloužily pro tento účel. Vyzkoušeno bylo několik různých intenzit mikrovlnného záření v rozmezí 2–5 kW. Jako nejvhodnější kombinace se ukázalo záření o síle 2 a 3 kW s posuvnou rychlostí dopravníku 0,4 m/min. Vyšší výkony mikrovlnného záření se neukázaly optimální z důvodu vytvoření značných makro-trhlin u použitých vzorků, které výrazně narušily jejich strukturu.

Vlastní mikrovlnná modifikace

První skupina vzorků byla mikrovlnně modifikována v mikrovlnné lince při frekvenci 2,45 GHz, použitém výkonu 2 kW a posuvné rychlosti dopravního pásu 0,4 m/min. Pro druhou skupinu byla použita stejná frekvence i rychlost dopravníku, ale zvýšil se výkon na 3 kW. Vzorky se pokládaly postupně na pásový dopravník, který je dopravil do komory s mikrovlnným zářením. Každý vzorek byl upravený jednou dávkou záření. Pro zajímavost bylo do komory umístěno teplotní čidlo, které měřilo teplotu povrchu daného modifikovaného vzorku. Ihned po projetí se vzorek znovu zvážil, tak jak tomu bylo před modifikací a spočítal se hmotnostní úbytek.

4.4 Impregnace dřeva

Stejně jako mikrovlnná modifikace, tak i samotná impregnace dřeva probíhala ve Výzkumném centru v Útěchově.

4.4.1 Úprava a vážení zkušebních vzorků

Po mikrovlnné úpravě byla u všech skupin vyrobených vzorků zatřena čela pomocí dvousložkového epoxidového laku. Zatření čel způsobilo příjem impregnační látky pouze z bočních ploch vzorků. Díky tomu můžeme po samotné impregnaci počítat s příjmem látky pouze v příčném směru, což je v praxi zásadní problém u dřeva smrku.

K zatření se použil lak EPOLEX S1300 smíchaný s tužidlem EPOLEX S7300 v předepsaném poměru 10:4. Po aplikování na dřevo společně vytvoří lesklý, velmi tvrdý film, který je schopen odolávat některým chemickým látkám jako jsou např. alkálie, oleje, pohonné hmoty, voda, některá rozpouštědla. Pro stoprocentní zamezení průniku ochranné látky byla čela vzorků zatřena dvakrát. První vrstva nátěru vytvrzovala 24 hodin, po zaschnutí se plocha lehce přebrousila brusným papírem a provedl se druhý nátěr, který vytvořil dokonale odolný film.

Následně byly vzorky zváženy na laboratorní váze s přesností na 0,001 g a získané hodnoty se zapsaly do tabulky v programu Excel.

4.4.2 Impregnační roztok

Impregnačním přípravkem byl Bochemit Forte Profi, který je určený pro preventivní ochranu dřeva proti napadení biotickými škůdci. Jedná se o vodu nevyluhovatelý fungicidní a insekticidní koncentrát, používaný především pro impregnaci stavebních konstrukcí, sloupů, pilířů a pro prvky vystaveny přímému styku se zemí nebo sladkou vodou, spadající do 4. třídy ohrožení (dle ČSN EN 335-1, 2, 3). Dřevo po ošetření získá šedozelený odstín. Je určený pro vakuově tlakovou impregnaci (www.bochemie.cz).

Po chemické stránce jde o přípravek ředitelný vodou na bázi mědi, s nízkou viskozitou pro poskytnutí rychlého průniku látky do struktury dřeva. Účinné látky Bochemitu Forte Profi jsou:

- Dihydroxid-uhličitan mědnatý (200 g/kg)
- Tebukonazol (3 g/kg)
- Propikonazol (3 g/kg)

4.4.3 Úprava impregnačních procesů

Impregnace proběhla ve dvou rozdílných cyklech metodou plného nasycení buněk dřeva – Bethell (kap. 3.2.3.2). První proces probíhal klasickým způsobem v časovém intervalu 3 až 4 hodin, jednalo se o tzv. „short process“. Zatímco druhý proces byl upravený na celkovou dobu impregnace 24 hodin, tzv. „long process“. Rozdíl mezi jednotlivými procesy je následující:

- A. „Short process“ (SP) - trvající celkem 225 min, složený ze 3 kroků.
 - 90 min podtlak (10 kPa)
 - 120 min přetlak (900 kPa)
 - 15 min podtlak (20 kPa)
- B. „Long proces“ (LP) - trvající celkem 1440 min, složený z 9 kroků.
 - 225 min short process (SP)
 - 90 min podtlak (10 kPa)
 - 900 min přetlak (900 kPa)
 - 225 min short process (SP)

4.4.4 Impregnační linka

Jedná se o vakuově tlakový autokláv (Obr. 11) vyrobený z kvalitní nerezové oceli, sloužící především na úpravu vlastností dřeva. Linka je sestavena z tlakových nádob, elektrického ohřívače a elektrického zařízení. Během provozu lze používat přetlak, podtlak a vysokých teplot impregnačních látek (až 160 °C).



Obr. 11 Vakuově tlaková impregnační linka (Pařil 2016)

4.4.5 Průběh vakuově tlakové impregnace

Jako první byla smíchána ochranná látka s vodou, aby vznikl roztok o 5% koncentraci, který se poté přelil do zásobní nádrže.

Začátek stanovených impregnačních cyklů byl stejný (viz. 4.4.3), což umožnilo začít impregnovat všechny skupiny vzorků společně. Vzorky určené pro dlouhý proces „short process – LP“ se naskládaly jako první, do zadní části nádrže, a vzorky pro krátký proces impregnace „short process – SP“ do přední části.

V první fázi impregnace se pomocí vakuového čerpadla snížil tlak na 10 kPa. Podtlaková fáze se udržovala 90 min, přičemž zhruba o 40 min později se spustilo napouštění impregnační nádrže ochrannou látkou. Po skončení této doby byl postupně zvyšován tlak až na 900 kPa. Uplynutím 120 min nastalo odčerpávání impregnační

látky zpět do zásobní nádrže a vytvoření třetí fáze snížením tlaku o 80 kPa na dobu 15 min. Na konci závěrečné fáze byl srovnán podtlak na tlak atmosférický, vyjmuly se vzorky spadající do impregnace krátkého procesu „SP“, zavřelo se víko, došlo ke snížení tlaku o 90 kPa na 90 min a po určité době začalo opět napouštění ochranou látkou. Následně nastalo zvyšování tlaku na 900 kPa s dobou trvání 15 hodin. V konečné fázi dlouhého procesu se uskutečnil ještě jednou krátký proces bez jakéhokoliv přerušování. Celková doba impregnace trvala 24 hod.

4.4.6 Vážení impregnovaných vzorků

Vážení modifikovaných vzorků se provádělo totožným způsobem jako měření nemodifikovaných vzorků. Po vytažení z autoklávu se vzorky otřely od zbytků impregnační látky a zvážily se pomocí laboratorní váhy s přesností na 0,001 g.

4.4.7 Vyhodnocení příjmu impregnační látky

Příjem impregnační látky se počítal podle vzorce:

$$\text{Příjem} = \frac{m_m - m_n}{V_m} \times 100 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

Kde: Příjem – příjem impregnační látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], m_m – hmotnost impregnovaného vzorku [kg], m_n – hmotnost vzorku před impregnací [kg], V_m – objem vzorku po impregnaci [m^3]

4.5 Měření míry proimpregnování a hloubky průniku.

Měření probíhalo u nařezaných vybraných vzorků z jednotlivých skupin. V první řadě byl připraven roztok smícháním ethanolu a dithiooxamidu s koncentrací účinné látky 0,5 %, kterým se natřely čelní plochy rozřezaných vzorků. Po aplikaci roztoku byly vloženy na dobu 10 minut do exsíkátoru s již přidaným hydroxidem amonným o koncentraci 25 %. Při působení par amoniaku na proimpregnovanou část vzorku impregnační látkou, došlo k reakci s přítomnou mědí a výraznému zbarvení těchto míst do tmavě modré barvy.

U ošetřených vzorků byly pomocí digitálního fotoaparátu pořízeny fotografie v postačující kvalitě pro následné zjištění hloubky průniku společně s mírou proimpregnování. Vyhodnocování probíhalo v programu ImageJ. Na jednotlivých snímcích byly vyznačeny plochy vzorků, u kterých se spočítaly jejich obsahy. Následovalo převedení fotek na barevnou hloubku 8bitů (256 barev = šedá škála)

a pomocí segmentace obrazu metodou prahování (*angl. thresholding*) byly zvýrazněny pouze proimpregnované části (Obr. 12), které se opět spočítaly. Pro výpočet míry proimpregnování na příčném řezu se použil následující vzorec:

$$n = \frac{S_i}{S} \times 100 [\%]$$

Kde: n – míra proimpregnování [%], S_i – plocha proimpregnované oblasti na řezu vzorku [-],

S – celková plocha řezu vzorku

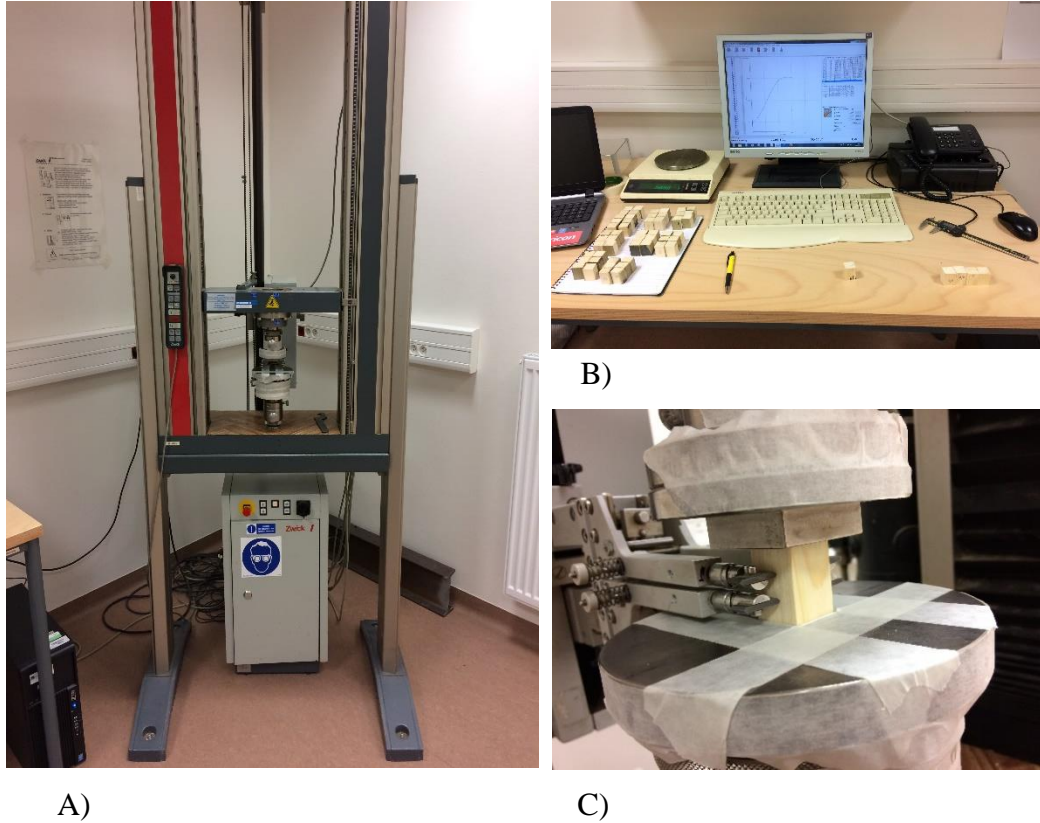
V programu ImageJ se na jednotlivých snímcích provádělo i měření hloubky průniku. Po nastavení měřítka v programu se zjišťoval průnik od hrany vzorků až k hranici přechodu zbarvení dřeva mezi proimpregnovanou a neproimpregnovanou částí. Na každém vzorku se provedlo měření na deseti místech a následně se zprůměrovalo.



Obr. 12 Zvýraznění impregnované části vzorku (černá) s neproimpregnovanou částí (bílá)

4.6 Mechanická zkouška

Pro zjišťování mechanických vlastností se použil univerzální zkušební stroj ZWICK Z050 zobrazeny na Obr. 13.



Obr. 13 A – zkušební stroj ZWICK Z050, B – pracovní plocha s potřebným vybavením k měření, C – zkušební tělísko s extenzometry

4.6.1 Příprava vzorků na mechanickou zkoušku

K provedení zkoušky byly použity vzorky o standartních rozměrech $20 \times 20 \times 30$ mm (R \times T \times L), které se získaly rozřezáním impregnovaných hranolků na čtvrtiny a krácením na formátovací pile. Byly vybrány vzorky bez viditelných vad, následně uloženy v klimatizačním zařízení při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 % a naklimatizovány na vlhkost přibližně 12 %. U těchto vzorků byl měřen modul pružnosti a mez pevnosti v tlaku ve směru vláken dle platných norem (ČSN 49 0110 a ČSN 49 0111).

4.6.2 Postup mechanické zkoušky

Zkušební stroj ZWICK Z050 byl nastavený pro měření tlaku ve směru vláken. Před samotnou zkouškou se musely pomocí posuvného měřítka a laboratorní váhy změřit všechny rozměry a hmotnost zkušebního tělíska. Naměřené parametry byly zapsány do softwaru TestXpert a vzorek se umístil na střed statické části stroje. Pro přesné uložení se pomocí papírové lepicí pásky vyznačila plocha, aby nedocházelo k vyosení působící síly. Následujícím krokem došlo k předzatížení vzorku, připojení extenzometrů a zatížení vzorku. Na monitoru počítače (Obr. 13) bylo možné pozorovat průběh pracovního diagramu napětí a poměrné deformace. Zkouška byla ukončena po dosažení meze pevnosti a následnému poklesu zatěžovací síly.

4.7 Statistické vyhodnocení

V první řadě bylo potřeba v programu Excel uspořádat a zpracovat všechna naměřená data a vyřadit takové hodnoty, které mohly být způsobeny a ovlivněny vadami přehlédnutými při výrobně zkušebních vzorků. Takto získaná data byla zpracována a porovnána v analytickém programu Statistica CZ 12. K vyhodnocení byla použita nejen popisná statistika společně s krabicovými grafy, ale i jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA rozšířena o Tukeyho HSD test vícenásobného porovnání. Pro ověření závislostí některých veličin mezi sebou se použil model lineární regrese vytvořený pomocí bodového grafu.

5 Výsledky

Pro přehlednější interpretování výsledků jednotlivých skupin se v této kapitole použily kratší výrazy, u skupin s mikrovlnnou předúpravou a impregnací ve formě – 2 a 3 kW, stejné změny jsou i u meze pevnosti – MOR a modulu pružnosti – MOE.

5.1 Příjem impregnační látky

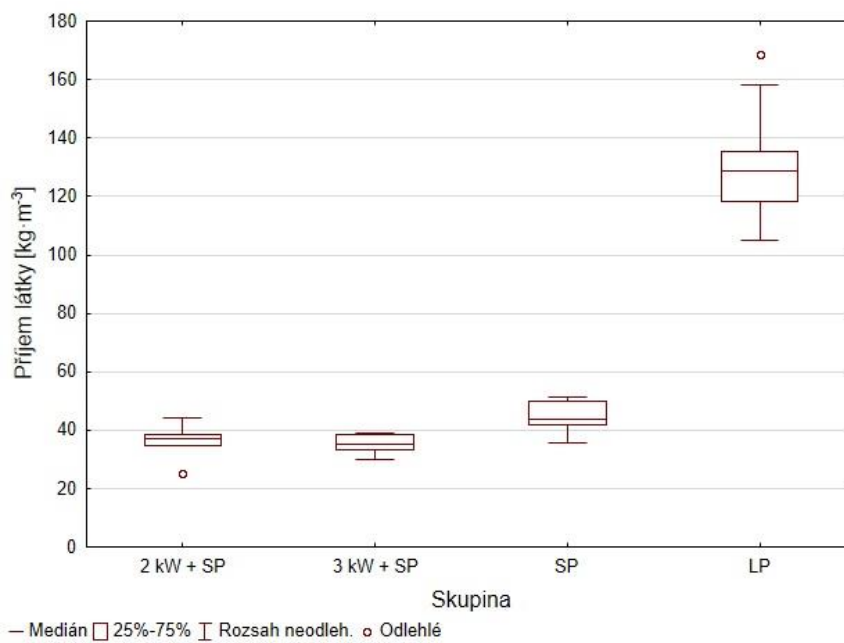
Naměřené hodnoty příjmu impregnační látky u dřeva smrku uvádí Tab. 7. V této tabulce jsou uvedeny vybrané charakteristiky popisné statistiky, pro jednotlivé skupiny modifikovaných zkušebních vzorků.

Tab. 7 Popisná statistika příjmu impregnační látky pro jednotlivé skupiny

	2 kW	3 kW	SP	LP
Průměr [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	36,4	35,1	44,1	132,1
Medián [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	36,9	35,0	43,7	128,9
Sm. odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	4,9	3,3	5,5	20,3
Rozptyl [$\text{kg}^2\cdot\text{m}^{-6}$]	24,2	10,9	31,0	413,6
Var. koeficient [%]	13,5	9,4	12,6	15,4
Minimum [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	25,0	29,7	35,5	104,8
Maximum [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	44,3	38,9	51,5	168,6
Počet vzorků [ks]	10	10	10	10

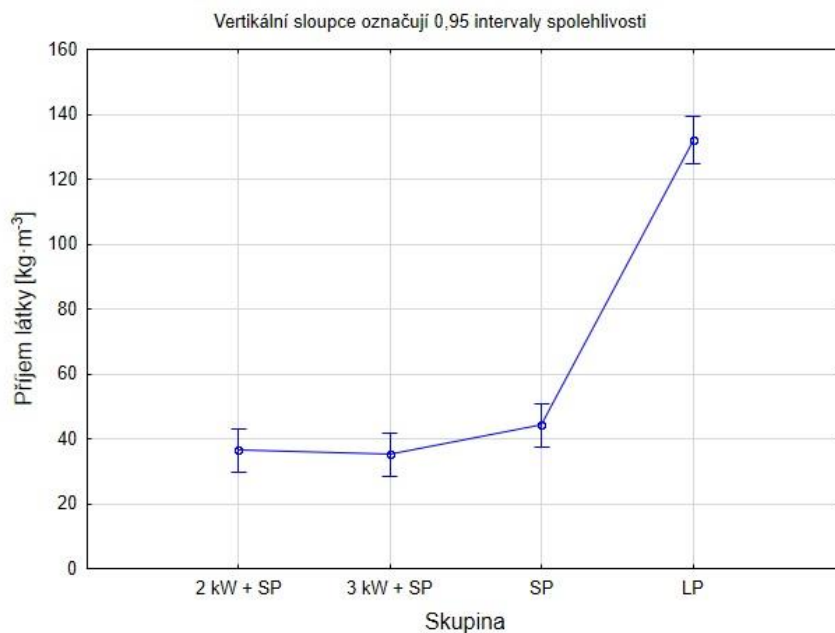
Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že průměrná hodnota příjmu impregnační látky u skupiny vzorků modifikovaných dlouhým procesem impregnace (LP) je výrazně vyšší, oproti prvním dvěma skupinám až čtyřnásobně. Dosahuje průměrné hodnoty $132,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ s variabilitou 15,4 %. Průměrné hodnoty příjmu ochranné látky první (2 kW) a druhé (3 kW) skupiny, u kterých proběhla předúprava pomocí mikrovlnného záření jsou téměř shodné a odpovídají $36,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $35,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ s rozdílnou výší variability 13,5 % a 9,4 %. U skupiny vzorků modifikovaných krátkým procesem impregnace (SP) bez mikrovlnné předúpravy je oproti předchozím dvěma skupinám průměrná hodnota příjmu látky mírně vyšší - 44,1 % s variabilitou 12,6 %.

Pro lepší představu vzájemného porovnání jednotlivých skupin je na Obr. 14 uveden krabicový graf zobrazující příjem impregnační látky u měřených vzorků, díky kterému lze pozorovat výrazný rozdíl příjmu u dlouhodobého procesu (LP). Maximální naměřená hodnota dosahuje $168,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obr. 14 Grafické znázornění příjmu impregnační látky u jednotlivých skupin

Statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými skupinami modifikovaných vzorků byly zkoumány pomocí jednofaktorové ANOVY, které jsou graficky znázorněny na Obr. 15. Z grafu lze zjistit, že mezi skupinami existuje statisticky významný rozdíl.



Obr. 15 Graf ANOVY znázorňující závislost příjmu impregnační látky na skupině vzorků

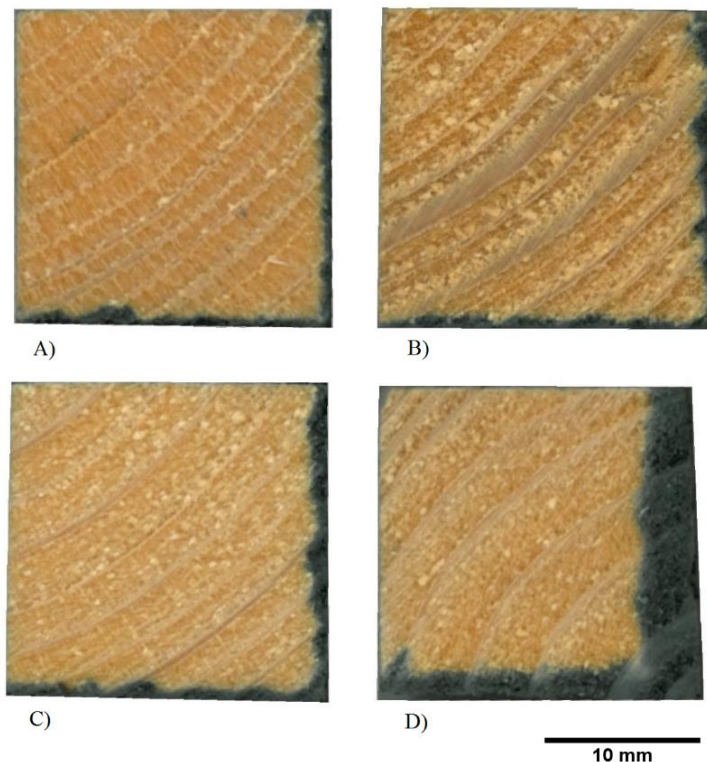
Pro prokázání statisticky významných rozdílů mezi jednotlivými skupinami, byl vybrán Tukeyho test vícenásobného porovnání, kde červeně vyznačené výsledky v tabulce vykazují hodnotu p nižší než 0,05, což udává, že rozdíly mezi skupinami jsou statisticky významné (Tab. 8). Můžeme poukázat na skupinu LP, která i pomocí testu prokázala staticky významný rozdíl vůči všem ostatním skupinám (SP, 3 kW, 2 kW).

Tab. 8 Vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného porovnání pro příjem impregnační látky

Skupiny	2 kW	3 kW	SP	LP
2 kW		0,993964	0,366797	0,000160
3 kW	0,993964		0,244900	0,000160
SP	0,366797	0,244900		0,000160
LP	0,000160	0,000160	0,000160	

5.2 Hloubka průniku

Obr. 16 zobrazuje hloubku průniku impregnační látky na čelních řezech vzorků po provedení impregnace.



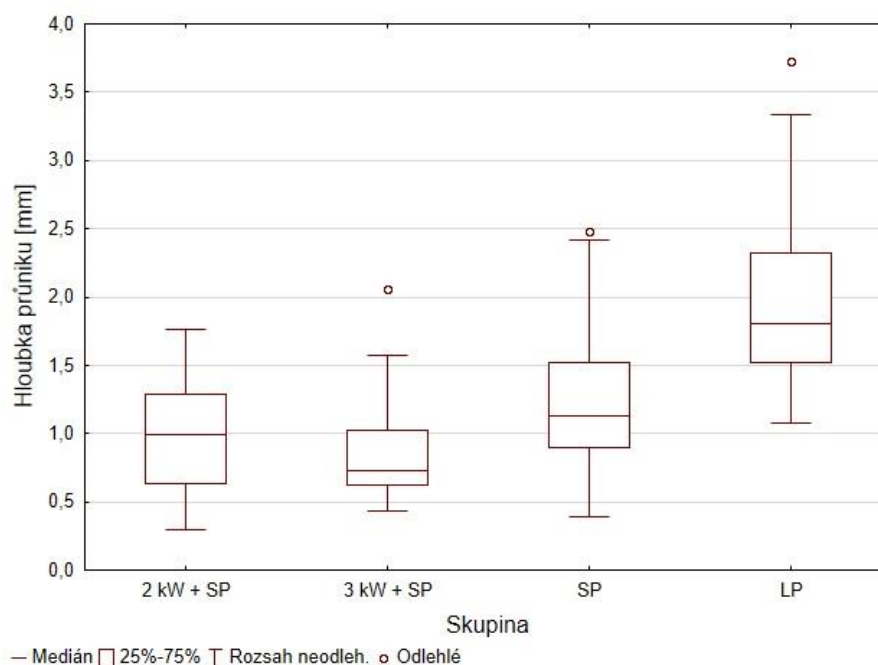
Obr. 16 Ukázka hloubky průniku na příčných řezech vybraných vzorků: A – skupina 2 kW + SP, B – skupina 3 kW + SP, C – SP, D – LP

V Tab. 9 jsou uvedené výsledky pomocí popisné statistiky pro měření hloubky průniku impregnační látky u jednotlivých skupin. Průměrné hodnoty u prvních dvou skupin s mikrovlnnou předúpravou a krátkým režimem impregnace se od sebe liší o 0,15 mm. Nejvyšší průměrná hodnota byla zaznamenána u skupiny LP, kdy dosahuje 2,02 mm s variabilitou 34,60 %, což znamená téměř dvakrát větší hloubku průniku impregnační látky oproti skupinám s mikrovlnnou předúpravou a SP. Skupina modifikovaná krátkým procesem měla průměrnou hodnotu 1,24 mm s variabilitou 42,44 %. Nejmenší průměrná hodnota byla u skupiny 3 kW a to 0,85 mm.

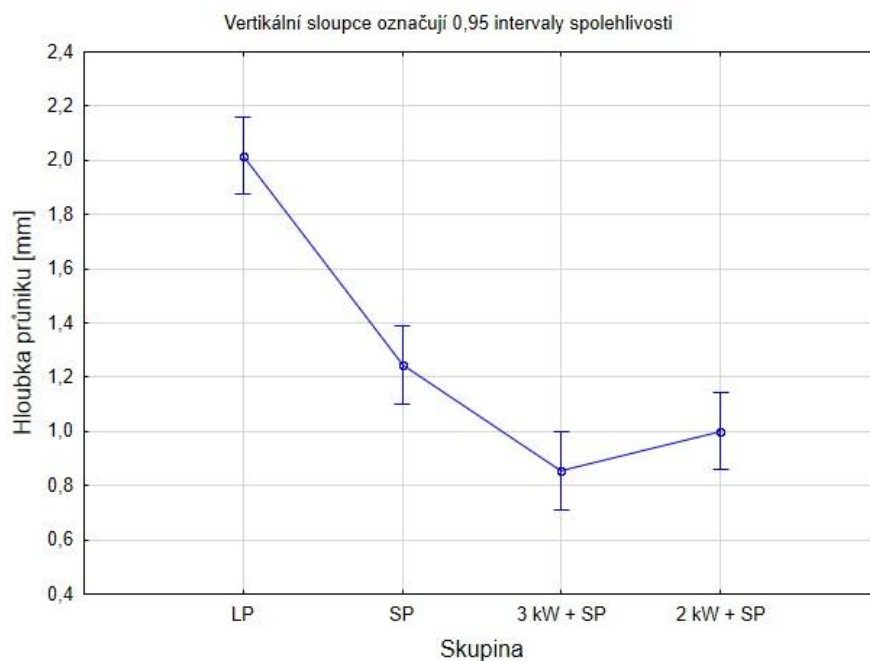
Tab. 9 Popisná statistika hloubky průniku látky pro jednotlivé skupiny

	2 kW	3 kW	SP	LP
Průměr [mm]	1,00	0,85	1,24	2,02
Medián [mm]	0,99	0,73	1,13	1,81
Sm. odchylka [mm]	0,39	0,34	0,53	0,70
Var. koeficient [%]	39,07	39,63	42,44	34,60
Minimum [mm]	0,30	0,43	0,39	1,07
Maximum [mm]	1,76	2,06	2,48	3,73
Počet měření [ks]	10	10	10	10

Na Obr. 17 jsou pro přehlednost uvedeny krabicové grafy zobrazující průnik látky daných skupin.



Obr. 17 Grafické znázornění hloubky průniku impregnační látky u jednotlivých skupin



Obr. 18 Graf ANOVY znázorňující závislost hloubku průniku impregnační látky na skupině vzorků

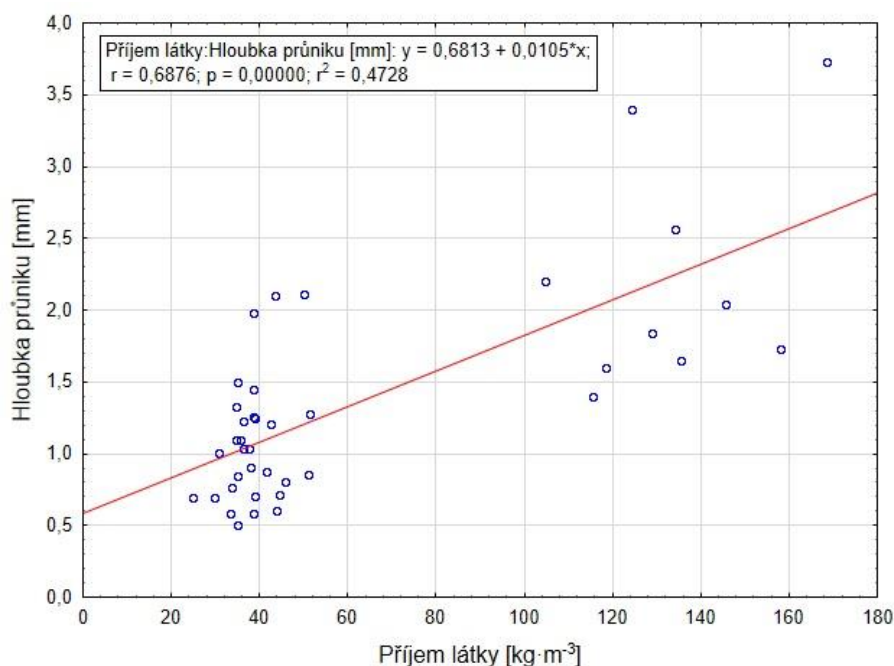
Z grafu jednofaktorové ANOVY (Obr. 18) byly zjištěny staticky významné rozdíly hloubky průniku mezi skupinami LP – SP, 3 kW, 2 kW a SP – 3 kW, LP.

Následné použití Tukeyho HSD testu významných rozdílů (Tab. 10) nám prokázalo statistické rozdíly mezi skupinami. Hodnoty v tabulce představují p -hodnoty testu mnohonásobného porovnání. Když je p -hodnota menší než hodnota testového kritéria $\alpha = 0,05$ platí, že hypotéza o rovnosti dvou porovnávaných skupin se zamítá. Střední hodnoty dvou porovnávaných skupin se považují za statisticky odlišné.

Tab. 10 Vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného porovnání pro hloubku průniku látky

Skupina	LP	SP	3 kW	2 kW
LP		0,000008	0,000008	0,000008
SP	0,000008		0,000856	0,079188
3 kW	0,000008	0,000856		0,481139
2 kW	0,000008	0,079188	0,481139	

Pro posouzení závislosti hloubky průniku na příjmu impregnační látky byl zvolen model lineární regrese (Obr. 19). Z grafu vyplývá, že hodnota p je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$, což znamená, že zde existuje určitá statisticky významná závislost, přestože výsledek může být ovlivněn existencí dvou izolovaných skupin dat. Hodnota r je nazývána Pearsonův korelační koeficient, který udává míru těsnosti lineární závislosti.



Obr. 19 Model lineární regrese – závislost hloubky průniku na příjmu impregnační látky

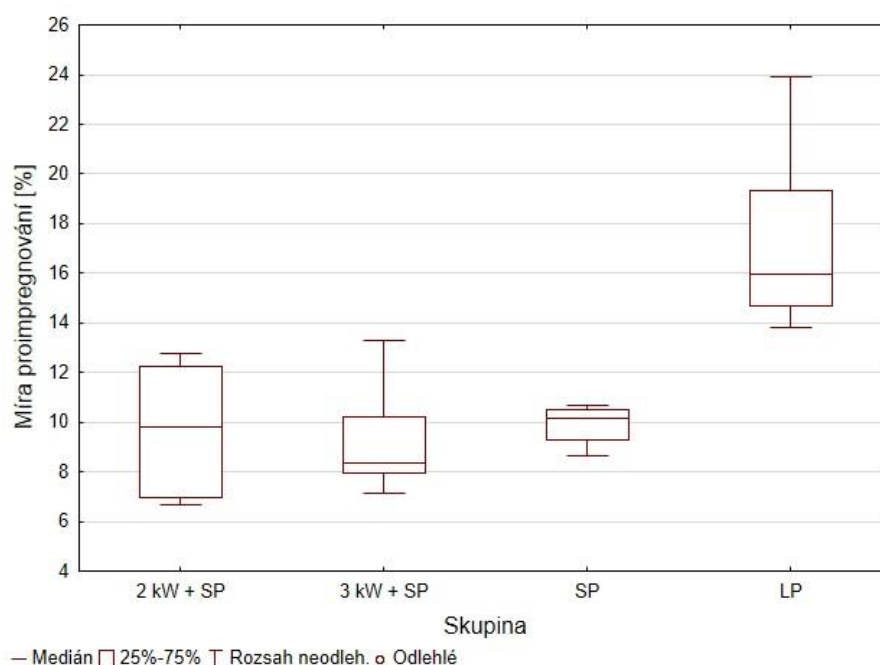
5.3 Míra proimpregnování

V Tab. 11 jsou uvedeny výsledky měření míry proimpregnování u jednotlivých skupin modifikovaných vzorků. Z tabulky je zřejmé, že nevyšší průměrná hodnota míry proimpregnování vyšla u skupiny LP 17,55 % s variabilitou 23,60 %. U zbylých skupin s mikrovláknou předúpravou a krátkým procesem impregnace (SP) byly naměřené hodnoty téměř totožné s hodnotami od 9,69 % do 9,90 %. Rozdíl nastal u velikosti variability jednotlivých skupin. SP skupina vykazuje nejnížší stupeň variability 8,91 %, zatímco 2 kW a 3 kW mají 29,49 % a 26,09 %.

Tab. 11 Popisná statistika míry proimpregnování pro jednotlivé skupiny

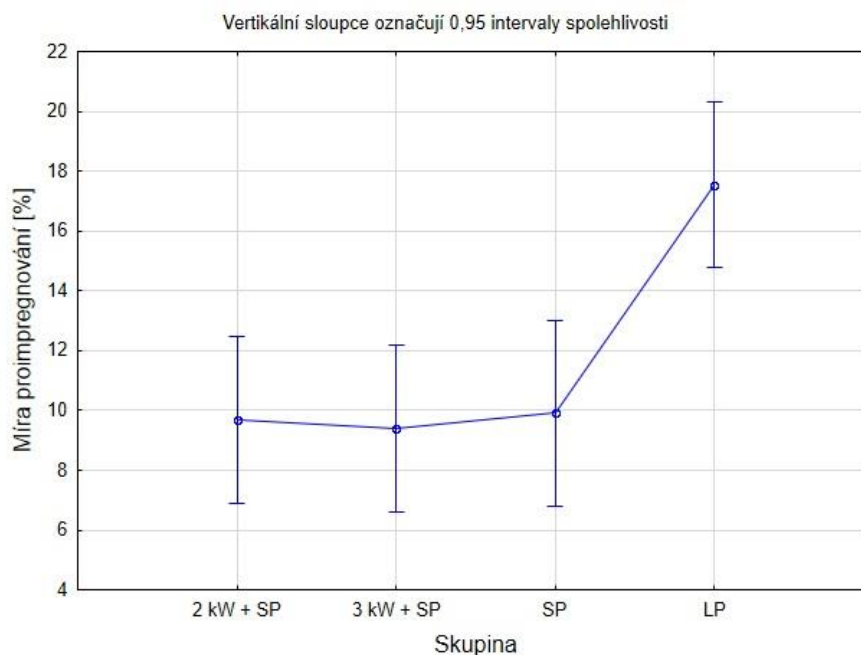
	2 kW	3 kW	SP	LP
Průměr [%]	9,69	9,41	9,90	17,55
Medián [%]	9,84	8,38	10,15	15,96
Sm. odchylka [%]	2,86	2,45	0,88	4,14
Var. koeficient [%]	29,49	26,09	8,91	23,60
Minimum [%]	6,66	7,14	8,67	13,84
Maximum [%]	12,75	13,30	10,66	23,93
Počet vzorků [ks]	10	10	10	10

Na Obr. 20 můžeme pozorovat výrazný nárůst míry proimpregnování u skupiny LP, kde maximální hodnota byla 23,93 %. Zatímco nejnižší hodnota proimpregnování byla u skupiny 2 kW a to 6,66 %.

**Obr. 20 Grafické znázornění míry proimpregnování vzorků u jednotlivých skupin**

Z grafu jednofaktorové ANOVY (Obr. 21) můžeme vypočítat, že u skupiny LP existuje statisticky významně odlišný rozdíl vůči skupinám SP, 3 kW a 2 kW.

Pro přesnější určení byl udělán Tukeyho HSD test významných rozdílů (Tab. 12), který potvrdil statisticky významný rozdíl u skupiny LP s ostatními skupinami. Zobrazené hodnoty v tabulce představují p -hodnoty testu vícenásobného porovnání. Když je p -hodnota menší než hodnota testového kritéria $\alpha = 0,05$ platí, že hypotéza o rovnosti dvou porovnávaných skupin se zamítá. Střední hodnoty dvou porovnávaných skupin se považují za statisticky odlišné.

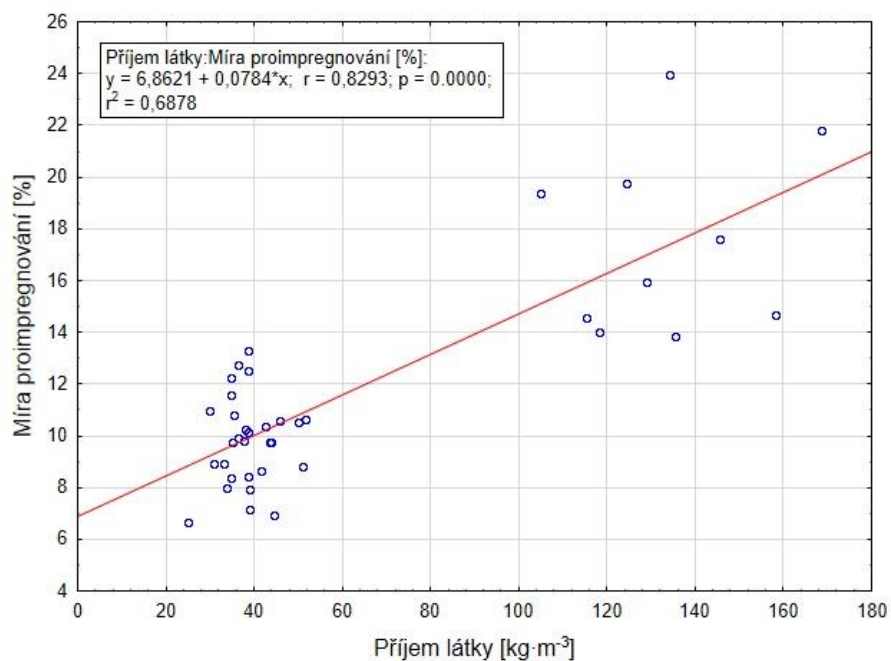


Obr. 21 Graf ANOVY znázorňující závislost míry proimpregnování na skupině vzorků

Tab. 12 Vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného porovnání pro míru proimpregnování

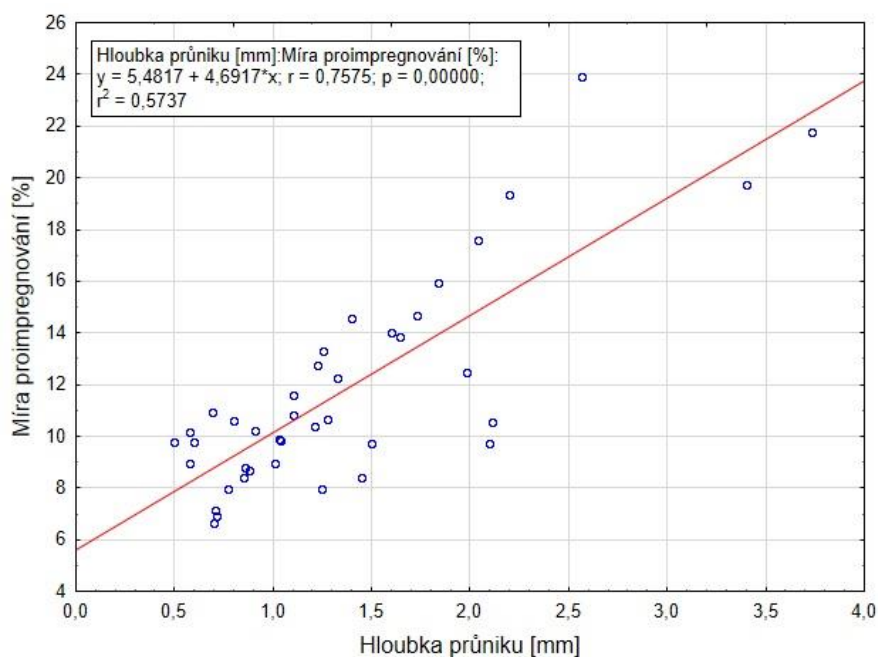
Skupina	2 kW	3 kW	SP	LP
2 kW		0,998790	0,999534	0,003522
3 kW	0,998790		0,994170	0,002661
SP	0,999534	0,994170		0,006959
LP	0,003522	0,002661	0,006959	

Následující graf (Obr. 22) posuzuje závislost míry proimpregnování na příjmu impregnační látky. Pro znázornění byl zvolen model lineární regrese. Z grafu vyplývá, že hodnota p je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$, a že existuje lineární závislost, která je statisticky významná, ačkoli výsledek může být ovlivněn existencí dvou izolovaných skupin dat. Hodnota r nazývána Pearsonův korelační koeficient, udává míru těsnosti lineární závislosti.



Obr. 22 Model lineární regrese – závislost míry proimpregnování na příjmu impregnační látky

Další graf (Obr. 23) posuzuje závislost míry proimpregnování na hloubce průniku ochranné látky. Pro tyto účely byl znovu použit model lineární regrese. Z grafu vyplývá, že hodnota p je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$, a že existuje lineární závislost, která je statisticky významná, i když výsledek může být ovlivněn existencí dvou izolovaných skupin dat. Hodnota r udává míru těsnosti lineární závislosti.



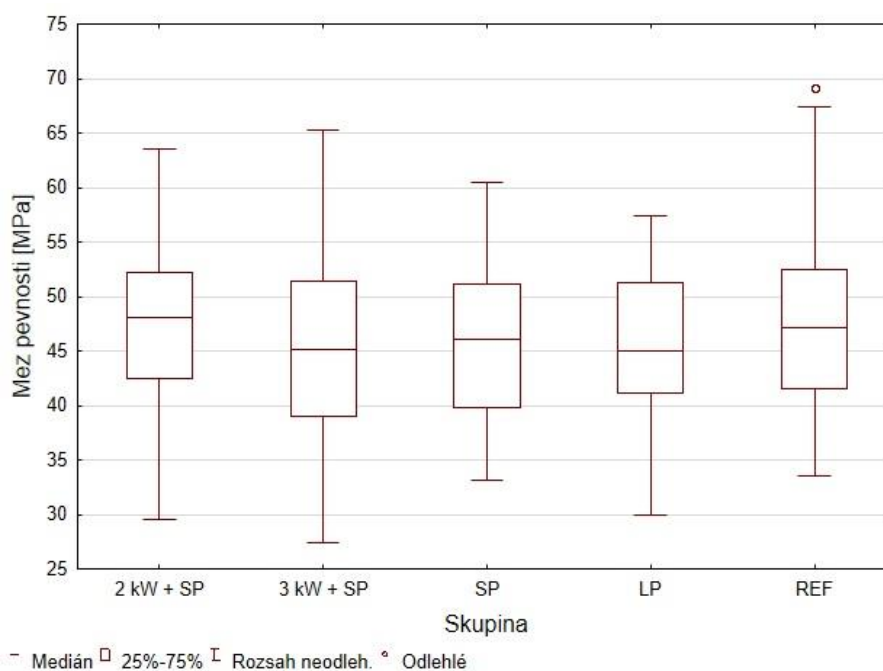
Obr. 23 Model lineární regrese – závislost míry proimpregnování na hloubce průniku

5.4 Mez pevnosti (MOR) v tlaku podél vláken

Výsledky popisné statistiky MOR, jsou uvedeny v následujícím přehledu (Tab. 13). Průměrné hodnoty MOR jsou u všech pěti skupin velmi podobné. Nejvyšší průměrná hodnota MOR náleží skupině referenčních vzorků a vychází 47,6 MPa s variabilitou 16,3 %, zatímco u první skupiny vzorků s mikrovlnnou úpravou (2 kW) se snížila o pouhých 0,3 MPa na 47,3 MPa s variabilitou 14,7 %. Skupiny SP a LP, což značí modifikované vzorky bez mikrovlnné úpravy, mají průměrné hodnoty MOR 46,3 MPa a 45,7 MPa s variabilitou 16,0 % a 14,1 %. U skupiny s nejvyšším stupněm mikrovlnné modifikace (3 kW) byla MOR nejnižší v průměru 45,7 MPa s variabilitou 16,0 %. Pro lepší přehlednost jsou na Obr. 24 zobrazeny krabicové grafy, na kterých lze pozorovat podobné výsledky u všech pěti měřených skupin.

Tab. 13 Popisná statistika MOR podél vláken pro všechny skupiny

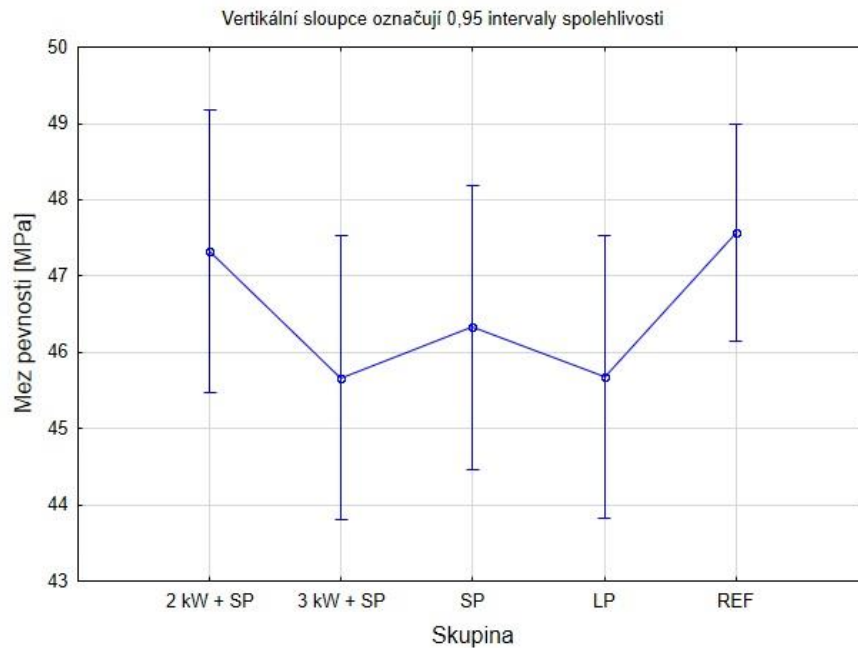
	2 kW	3 kW	SP	LP	REF
Průměr [MPa]	47,3	45,7	46,3	45,7	47,6
Medián [MPa]	48,1	45,1	46,1	45,1	47,2
Sm. odchylka [MPa]	7,0	7,5	7,4	6,5	7,8
Var. koeficient [%]	14,7	16,4	16,0	14,1	16,3
Minimum [MPa]	29,5	27,4	33,2	29,9	33,5
Maximum [MPa]	63,5	65,3	60,5	57,5	69,1
Počet vzorků[ks]	60	60	60	60	60



Obr. 24 Grafické znázornění MOR u jednotlivých skupin

Při pohledu na graf jednofaktorové ANOVY (Obr. 25) můžeme pozorovat překrytí intervalů spolehlivosti v horizontálním směru. Tento fakt udává, že tyto skupiny nejsou vůči sobě statisticky významně odlišné.

Pro ověření byl proveden Tukeyho HSD test významných rozdílů (Tab. 14). Výsledné hodnoty p mnohonásobného porovnání vyšly vyšší než testové kritérium $\alpha = 0,05$, skrze to test potvrdil statistickou nevýznamnost zkoumaných skupin.



Obr. 25 Graf ANOVY znázorňující závislost MOR na skupině vzorků

Tab. 14 Vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného porovnání pro MOR

Skupina	2 kW	3 kW	SP	LP	REF
2 kW		0,726356	0,944526	0,732351	0,999606
3 kW	0,726356		0,988101	1,000000	0,497621
SP	0,944526	0,988101		0,988993	0,833360
LP	0,732351	1,000000	0,988993		0,504901
REF	0,999606	0,497621	0,833360	0,504901	

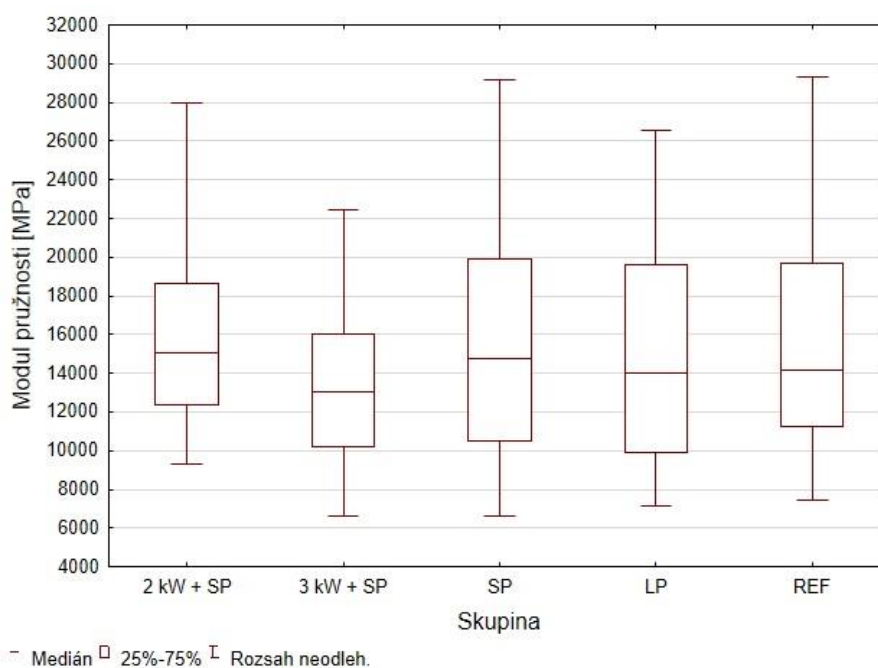
5.5 Modul pružnosti (MOE) v tlaku podél vláken

Popisnou statistiku MOE v tlaku ve směru vláken pro všechny měřené skupiny najdeme v Tab. 15. Nejvyšší průměrné hodnoty MOE si můžeme všimnout u skupiny s mikrovlnou předúpravou o výkonu 2 kW, dosahuje 16 554 MPa s variabilitou 33,0 %. Skupina 3 kW, která byla taktéž modifikovaná pomocí mikrovln, ale o vyšším výkonu odpovídá nejnižší průměrné hodnotě ze všech skupin, tedy 13 523 MPa s variabilitou 29,6 %. Skupina referenčních vzorků měla průměrnou hodnotu 15 430 MPa, což bylo více než u skupiny 3 kW.

Pro lepší představu jsou na Obr. 26 znázorněny krabicové grafy porovnávající MOE, kde můžeme zjistit, že i přes odlišné průměrné hodnoty u jednotlivých skupin jsou ve skutečnosti rozdíly minimální.

Tab. 15 Popisná statistika MOE pro jednotlivé skupiny

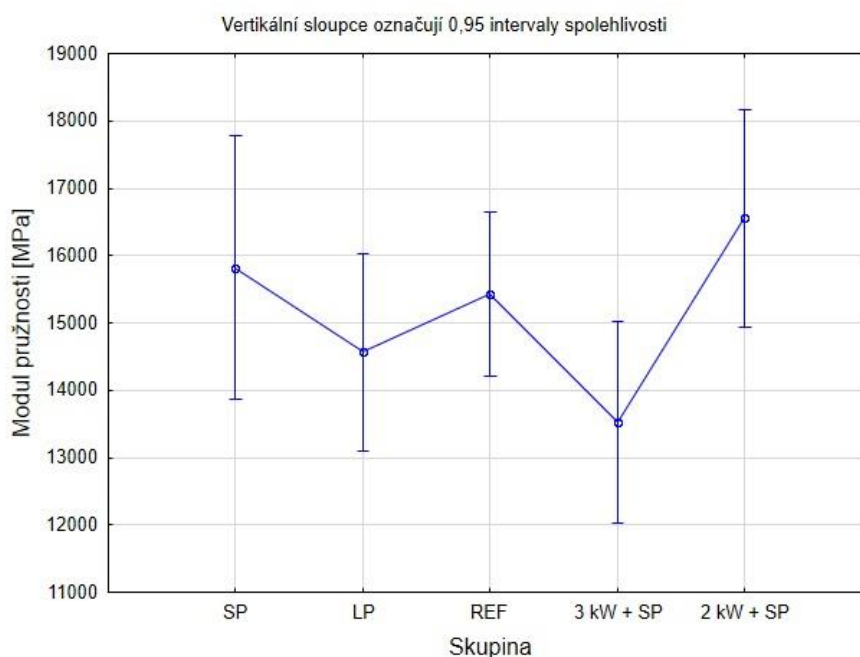
	2 kW	3 kW	SP	LP	REF
Průměr [MPa]	16 554	13 523	15 492	14 564	15 430
Medián [MPa]	15 023	13 007	14 083	13 997	14 128
Sm. odchylka [MPa]	5 469	4 010	6 675	5 152	5 418
Var. koeficient [%]	33,0	29,6	43,0	35,3	35,1
Minimum [MPa]	9 285	6 638	6 215	7 138	7 476
Maximum [MPa]	27 988	22 467	29 181	26 552	29 353
Počet vzorků [ks]	41	48	29	50	72



Obr. 26 Grafické znázornění MOE pro jednotlivé skupiny

Následující graf jednofaktorové ANOVY, který zobrazuje moduly pružnosti (Obr. 27), poukazuje na stejné překrytí intervalů spolehlivosti v horizontálním směru, jako tomu bylo u MOR. Tento fakt udává, že tyto skupiny nejsou vůči sobě statisticky významně odlišné.

Výsledky Tukeyho HSD testu mnohonásobného porovnání (Tab. 16) potvrzují statistickou nevýznamnost mezi všemi zkoumanými veličinami. Výsledné hodnoty p mnohonásobného porovnání vyšly u všech dvojic vyšší než testové kritérium $\alpha = 0,05$, což udává, že hypotéza o rovnosti dvou porovnávaných skupin se nezamítá.



Obr. 27 Graf ANOVY znázorňující závislost MOE na skupině vzorků

Tab. 16 Vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného porovnání pro MOE

Skupina	SP	LP	REF	3 kW	2 kW
SP		0,849716	0,997282	0,352542	0,979975
LP	0,849716		0,899741	0,865204	0,377736
REF	0,997282	0,899741		0,294725	0,811483
3 kW	0,352542	0,865204	0,294725		0,053132
2 kW	0,979975	0,377736	0,811483	0,053132	

6 Diskuse

6.1 Příjem impregnační látky

Výchozí a stěžejní ukazatel při tomto experimentu byl především příjem impregnační látky, který mohl být ovlivněn jak předúpravou pomocí mikrovlnného záření, tak i modifikací impregnačního procesu metodou Bethell.

Při prvním pohledu na výsledky uvedené v popisné statistice (Tab. 7) je zřejmé, že větší roli hrála modifikace impregnačního procesu nežli mikrovlnná úprava. Příjem u první skupiny, která byla modifikovaná mikrovlnným zářením o výkonu 2 kW a následně impregnovaná klasickou metodou Bethell (viz kap. 4.4.3), dosáhl průměrné hodnoty $36,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Velmi podobný a zároveň i nejnižší příjem ochranné látky měla druhá skupina impregnovaná stejnou metodou, ale modifikovaná vyšším výkonem mikrovlnného záření, která dosáhla hodnoty $35,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pomocí jednofaktorové ANOVY (Obr. 15) jsme zjistili, že vzorky s mikrovlnnou úpravou a krátkým procesem impregnace (SP) nejsou vůči sobě navzájem staticky významně odlišné, což následně potvrdil Tukeyův HSD test (Tab. 8). Treu et al. (2008) v jejich experimentu mikrovlnně upravovali vyzrálé dřevo smrku o vyšším výkonem mikrovlnného záření 6 kW a došli k podobným výsledkům. Tvrdí, že smrkové vzorky, po jednom i více intervalech ozařování, vykazovali téměř nulové rozdíly v příjmu vody ve srovnání s neošetřenými vzorky, v některých případech dokonce došlo ke snížení příjmu. V našem případě, předúprava mikrovlnným zářením u skupin s krátkým procesem impregnace způsobila nižší příjem impregnační látky (ačkoliv statisticky nevýznamný), než tomu bylo u skupiny SP s průměrnou hodnotou $44,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Mírně odlišné rozdíly mezi experimenty mohlo vyvolat zatření čel vzorků před samotnou impregnací, což znemožnilo příjem ochranné látky v axiálním směru dřeva.

Torgovnikov a Vinden (2006) popisují vliv mikrovlnné modifikace, díky které by mohlo docházet ke zvýšení propustnosti dřeva v radiálním směru ozářením dřeňových paprsků, a z důvodu jejich tenčí buněčné stěny oproti ostatním elementům k narušení vodivých cest. Ve dřevě smrku je však podíl dřeňových paprsků poměrně nízký (přibližně 5–7 %) na to, aby dokázaly nějak výrazně ovlivnit příjem látky. Působením mikrovlnného záření na strukturu dřeva mohlo dojít spíše k poškození stěn tracheid, a vytvoření tak mikro-trhlin. He et al. (2014) vystavili vzorky jedlového dřeva záření o výkonu 20 kW a frekvenci 915 MHz. Při zkoumání mikroskopických preparátů z modifikovaných vzorků objevili značené porušení na stěnách podélných tracheid

a buněčné stěny, což vedlo ke zvýšení propustnosti. Dle námi naměřených výsledků byla impregnovatelnost po použití mikrovlnné předúpravy spíše negativní. Jedním z důvodů může být nevhodně zvolený režim mikrovlnného záření společně s rychlostí posuvného dopravníku, při kterém nedošlo k možnému narušení struktury elementů dřeva. Další negativní vliv mohla mít teplota povrchu právě modifikovaného vzorku, jež se pohybovala v rozmezí 60–85 °C, a způsobila tak pouhé změkčení pryskyřice a její následné rozlití uvnitř vzorku. Z tohoto důvodu došlo k ucpání některých vodivých cest v radiálním směru. Teplota vzorků se zjišťovala skrze sondu zabudovanou v mikrovlnném zařízení.

Následující možná alternativa podněcující snížení propustnosti mohla být poměrně nízká vlhkost vzorků před samotnou modifikací, jež se při použití vlhkoměru pohybovala v rozmezí 33–38 %. Horáček (2008) popisuje totožné hodnoty jako průměrnou roční vlhkost vyzrálého dřeva smrku, zatímco u běli se pohybuje v průměru kolem 120 %. Listnaté dřeviny nemají mezi jádrem a bělí takové velké rozdíly a vlhkost se může pohybovat v mezi 70–90 %, díky čemuž může docházet k lepšímu zvýšení propustnosti při použití mikrovlnného záření. Yu et al. (2011) vysvětluje princip mikrovlnného zvýšení permeability, který je založen na vysoké vlhkosti a následném vzniku tlaku vodních par, což má za následek delaminaci buněčné stěny. Z toho vyplývá, že by máčení smrkových vzorků před modifikací a tím případné zvýšení vlhkosti mohlo mít pozitivní vliv.

Nejvyšší příjem ochranné látky se uskutečnil u skupiny LP, který byl oproti všem ostatním skupinám výrazně vyšší, a to až čtyřnásobně. Průměrná hodnota příjmu se vyšplhala na 132,1 kg·m⁻³ a po vyhodnocení Tukeyho HSD testu vícenásobného rozdílu jsme prokázali statisticky významné rozdíly skupiny LP vůči všem ostatním skupinám (Tab. 8). Takto zvýšeného příjmu se dosáhlo díky úpravě impregnačního procesu, kde celková doba impregnace v laboratorním autoklávu byla stanovena na 24 hodin, což je přibližně o 20 hodin více než při klasickém způsobu. Naměřené hodnoty a grafické znázornění krabicovými grafy (Obr. 14) vypovídá o tom, že příjem látky do struktury dřeva smrku, který je řazen do 4. třídy (dle ČSN EN 350-2) jako extrémně obtížně impregnovatelný, se zvyšuje díky prodloužení doby impregnace a působením přetlaku, v našem případě hodnotou 800 kPa. Zvyšování příjmu na čase však nemá lineární závislost, ale spíše závislost exponenciální, ta se vytváří stlačováním vzduchu v ošetřovaném dřevě, při jeho úplném ponoření do kapaliny, a tím poté vzniká protitlak vzduchu v buňkách dřeva, který postupem času narůstá (Reinprecht 2008).

Melcher a Zwiefelhofer (2013) prováděli experiment, jehož cílem bylo zjistit závislost času na příjmu tekutiny u jádra smrku, za použití odlišných režimů vakuově-tlakové impregnace. Čela vzorků byla zatřena i nezatřena a jejich impregnační postupy byly obdobné procesům použitým v této práci. Výsledky jejich výzkumu, u smrkových vzorků se zatřenými čely, vykazují u krátkodobého procesu (STP) příjem $104 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a u dlouhodobého procesu (LTP) příjem až $308 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tudíž stejně jako výsledky této práce, prokázali závislost času na příjmu impregnační látky u jádra smrku ztepilého (*Picea abies*). Celkově nižší příjmy u dlouhodobého procesu v této práci, oproti experimentu Melcher a Zwiefelhofer (2013), mohou být ovlivněny rozdílnou velikostí zkušebních vzorků (v této práci se použily vzorky většího průřezu) nebo odlišnou modifikací impregnačního cyklu (např. více fází a kombinací podtlaku s přetlakem). Důležitým aspektem k prozkoumání je ekonomičnost při použití dlouhodobého procesu impregnace.

6.2 Hloubka průniku

Při použití ochranné látky rozpustné ve vodě a za určitých podmínek, lze proimpregnovat běl smrku do hloubky 10–20 mm v radiálním směru (Paserin 1970), zatímco vyvrálé dřevo má výrazně nižší propustnost pro kapaliny a je zařazeno do 4. třídy impregnovatelnosti jako extrémně obtížně impregnovatelné s hloubkou průniku v řádech milimetrů (Ptáček 2009).

Výsledky měření hloubky průniku impregnační látky u jednotlivých skupin vzorků vyvrálého dřeva smrku můžeme pozorovat na Obr. 17 a v Tab. 9. Z grafického znázornění krabicovými grafy je zřejmé, že největšího průniku se docílilo u skupiny LP. Průměrná hloubka průniku vzorků LP je 2,02 mm, což je dvakrát více oproti ostatním skupinám. Skupina vzorků impregnovaná krátkým procesem (SP) měla průnik 1,24 mm. Skupiny vzorků, které byly prvně modifikovány mikrovlnným zářením a až poté naimpregnovány vykazovaly nejmenší hloubku průniku ochranné látky, průměrná hodnota u skupiny 2 kW dosahovala 1,00 mm a u výkonu 3 kW pouhých 0,85 mm. Zapříčinění takto nízkého průniku mohlo způsobit mikrovlnné záření, které zahřálo vzorek a způsobilo rozlití pryskyřice uvnitř vzorků. Možné způsoby jsou více popsány v předchozí kapitole.

Zkoumáním pomocí jednofaktorové ANOVY a Tukeyho HSD testu významných rozdílů (viz. Obr. 18 a Tab. 10) jsme zjistili statisticky významný rozdíl v hloubce průniku u skupiny LP impregnované dlouhým procesem, oproti všem ostatním skupinám. Tento rozdíl může být způsoben díky modifikaci impregnačního procesu, který byl stanovený na celkovou dobu impregnace 24 hodin a složený z 9 kroků. Použitím modelu lineární regrese (Obr. 19) jsme zjistili, že existuje určitá statisticky významná závislost mezi průnikem a příjmem impregnační látky. Z grafu tedy lze tvrdit, že čím je větší hloubka průniku daného vzorku, tím se také zvyšuje příjem ochranné látky.

Hlubšího průniku by se mohlo docílit použitím mechanických úprav, tzv. perforací, která se využívá před impregnací dřevěných sloupů. Jedná se o kontinuální navrtání po obvodu kmene vrtáky o průměru několika milimetrů do hloubky až 3 cm. (www.impregnacesobeslav.cz).

6.3 Míra proimpregnování

Vyhodnocování míry proimpregnování probíhalo pomocí programu ImageJ a výsledky měření můžeme sledovat v Tab. 11 a na Obr. 20.

Stejně jako příjem impregnační látky a hloubku průniku, tak i míru proimpregnování nejvíce ovlivnila modifikace impregnačního procesu s upravenou délkou času na 24 hodin. Průměrné hodnoty všech skupin modifikovaných mikrovlnným zářením a impregnovaných krátkodobým procesem jsou téměř stejné, v rozmezí 9,69–9,90 %, zatímco skupina LP prokázala dvakrát tak vyšší průměrnou hodnotu, která je 17,55 %. Ze získaných výsledků můžeme říci, že míra proimpregnování se zvyšuje v závislosti na délce impregnačního procesu.

Zkoumáním jednofaktorové ANOVY a Tukeyho HSD testu (Obr. 21 a Tab. 12) se zjistil statisticky významný rozdíl míry proimpregnování u skupiny LP, která se jako jediná liší od všech ostatních skupin impregnovaných krátkodobým procesem (SP). Pomocí modelu lineární regrese (Obr. 22) se prokázala statisticky významná závislost mezi mírou proimpregnování a příjmem impregnační látky.

Provedením dalšího grafu pomocí modelu lineární regrese (Obr. 23) se prokázala závislost míry proimpregnování na hloubce průniku. Z těchto důvodů se v praxi používá především měření hloubky průniku, které se provádí vizuální kontrolou odběrem vrtů.

6.4 Mechanické vlastnosti

Důvodem měření mechanických vlastností v této práci je použití mikrovlnné předúpravy, které může tyto vlastnosti ovlivnit.

Dömény (2012) zjistil během zkoumání změn permeability nepravého jádra bukového dřeva při použití mikrovlnného záření snížení mechanických vlastností dřeva. Příčina snížení mechanických vlastností může být způsobena tepelným namáháním struktury dřeva a tvorbou vodních par, které vytváří napětí přenášené na elementy dřeva. Další příčiny narušení struktury dřeva mikrovlnným zářením jsou už popsány v předchozí kapitole 5.1. Z těchto důvodů je, pokud možno potřeba, zvolit vhodný režim mikrovlnné předúpravy, který sice může způsobit mírné snížení mechanických vlastností, ale nikoliv však statisticky významné.

Výsledky meze pevnosti v tlaku ve směru vláken (MOR) lze pozorovat na Obr. 24 v Tab. 13, kde vidíme velmi podobné hodnoty MOR u všech skupin včetně skupiny referenčních vzorků. Průměr hodnot odpovídá rozmezí 45,7–47,6 MPa. Šetření pomocí jednofaktorové ANOVY a Tukeyho HSD testu vyhodnotilo, že skupiny vzorků nejsou vůči sobě statisticky významně odlišné, což je zřejmé i při pohledu na krabicové grafy. Při porovnání experimentálně zjištěných pevností vyzrálého dřeva smrku s výsledky uváděnými v literatuře (Tab. 5) se naše výsledky nijak neliší. Mez pevnosti všech skupin se nejvíce shoduje s hodnotou, kterou udává Wagenführ (2000) - 45,5 MPa.

Dalším zjišťovaným parametrem je modul pružnosti ve směru vláken (MOE). Výsledky průměrných hodnot MOE mezi jednotlivými skupinami jsou oproti MOR více variabilní, a proto bylo zapotřebí odstranit značné množství extrémních hodnot. Ty mohly být způsobeny tzv. otláčováním čel během působení tlaku podél vláken, což má za následek vysokou variabilitu hodnot, často až extrémních. U vzorků smrku dojde na řezané ploše k narušení těchto vláken. Dochází k tomu především u měkkých dřevin, z důvodu delších celulózových vláken a anatomických elementů, než tomu je například u dřeva buku (Brabec et al. 2014). Z popisné statistiky a krabicových grafů (viz Tab. 15 a Obr. 26) můžeme pozorovat u skupiny 3 kW nejnižší modul pružnosti odpovídající průměrné hodnotě 13 523 MPa a zároveň u skupiny 2 kW nejvyšší hodnotu 16 554 MPa. Následek snížení MOE po vystavení vzorků záření o výkonu 3 kW si vysvětlují možnou tvorbou vodních par a následnou delaminací buněčné stěny, zatímco nižší výkon záření 2 kW mohl působit na extraktivní látky, které mají vliv na změnu mechanických vlastností. Modul pružnosti u skupin SP, LP a REF odpovídá rozmezí

hodnot 14 564–15 492 MPa. Při použití jednofaktorové ANOVY a Tukeyho HSD testu se zjistila statistická nevýznamnost mezi všemi zkoumanými skupinami.

Porovnáním naměřených hodnot modulu pružnosti s hodnotami různých autorů (Tab. 5) jsme zjistili, že výsledky v naší práci vykazují mírně zvýšené hodnoty. Vyšší hodnoty modulu pružnosti můžeme odůvodnit použitím přídavných extenzometrů během mechanické zkoušky, které mají za následek přesnější vyhodnocování během měření mechanických vlastností, zatímco data získaná při dřívějších testech, na základě posunutí pohyblivého příčnicku na stroji nemusela být zcela přesná.

7 Závěr

Měřením bylo zjištěno, že zvolená mikrovlnná předúprava má negativní vliv na impregnovatelnost vyzrálého dřeva smrku ztepilého (*Picea abies*), zatímco modifikace impregnačního procesu metodou Bethell prokázala pozitivní výsledky. Použitou impregnační látkou byl přípravek na bázi mědi.

Mikrovlně modifikované vzorky dvou skupin, vystavené výkonu 2 kW a 3 kW při klasickém procesu impregnace (SP), prokázaly nejnižší příjmy ochranné látky kolem $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což bylo dokonce méně než u skupiny SP bez mikrovlnné úpravy. Nejvyšší příjem impregnační látky se uskutečnil u skupiny LP, impregnované upraveným procesem s celkovou dobou impregnace 24 hodin, který byl až čtyřnásobně vyšší oproti ostatním skupinám s průměrnou hodnotou $132,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Při měření hloubky průniku impregnační látky se u všech tří skupin s krátkým procesem impregnace dostala látka do hloubky kolem 1 mm, oproti skupině LP, kde je průměrná hodnota průniku 2,02 mm. Stejně tak i výsledky míry proimpregnování jsou u skupin s krátkým procesem impregnace velmi podobné, s průměrnou hodnotou 9,66 %, zatímco skupiny LP dosahují 17,55 %. Závěrečné výsledky a statistické vyhodnocení příjmu látky, hloubky průniku a míry proimpregnování v této práci prokázaly jejich závislost na upravené době vakuově-tlakové impregnace metodou Bethell (long process).

Po provedení mechanické zkoušky modifikovaných i referenčních vzorků jsme zjistili, že mez pevnosti (MOR) v tlaku ve směru vláken se nijak mezi sebou výrazně neliší a odpovídá hodnotám v rozmezí 45,7–47,6 MPa, výsledky se shodují s literaturou. Modul pružnosti (MOE) u všech skupin vzorků udává mírně zvýšenou variabilitu v rozmezí hodnot 13 523–16 554 MPa, ale v rámci skupin nebyly prokázány žádné statisticky významné rozdíly.

Závěrem lze říci, že modifikace impregnačního procesu má pozitivní vliv na impregnovatelnost vyzrálého dřeva smrku, na rozdíl od mikrovlnné předúpravy. Vyšší příjem impregnační látky nemá vliv na mechanické vlastnosti dřeva.

V následujících výzkumech by bylo vhodné se zaměřit na změnu mikrovlnného režimu (např. zvýšením výkonu nebo delší dobou expozice), který by mohl mít pozitivní vliv na příjem impregnační látky. Další možností by bylo zvýšení vlhkosti vzorků před modifikací. Dlouhodobý proces impregnace bude vhodné podrobněji prozkoumat a navrhnout tak další možné modifikace impregnačního procesu, např. úpravu jednotlivých kroků složenou z více fází podtlaku a přetlaku, což by mohlo mít za

následek ještě větší příjem ochranné látky. Pro možné využití dlouhodobého procesu impregnace v praxi je však potřeba vzít v úvahu energetickou a ekonomickou náročnost v dřevařském průmyslu v porovnání s klasickou dobou impregnace.

8 Summary

It was found that chosen microwave pretreatment has negative effect on impregnability of the spruce's heartwood, in contrary, modified Bethell impregnation method has shown to improve wood properties.

In samples that were modified by microwave power of 2 kW, or 3 kW and by short-process impregnation, the lowest intake of preservative was established—approximately $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, which was interestingly less than in short-process impregnation without microwave treatment. When the long-process impregnation was applied, the heartwood took up in average $132.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ of the preservative, which is the highest intake of preservative. In comparison with all other groups the intake was four times higher. By measuring the penetration of the impregnating substance, it was found that in all three groups where the short-process impregnation was used the preservative got no more than 1.24 mm under the surface of the heartwood. Interestingly, in samples modified by the so called long-process, the average depth of penetration was 2.02 mm. Levels of impregnation in short-process groups are similar—in average 9.66 %, in contrast, long-process' average result was 17.55 %. Final results and statistical evaluation of preservative intake, penetration depth, and level of impregnation showed the dependency on adjusted Bethell's vacuum-pressure impregnation method (long-process).

Modified and reference samples underwent a mechanical trial in which modulus of raptures (MOR) compressed parallel to the grain, and modulus of elasticity (MOE) was measured. It was found that MOR is not statistically different within the groups with results ranging between 45.7–47.6 MPa. MOE in all groups showed slightly increased variability—13 523 to 16 554 MPa—however, no statistically significant results were found.

In conclusion, it can be said that the modification of impregnation process has positive effect on impregnability of Norwegian spruce's heartwood, in contrary to microwave pretreatment and short-process impregnation. Moreover, the higher intake of preservative substance has no influence on heartwood's mechanical properties.

9 Seznam použité literatury

BARAKS. A., NIKIFOROV. N., 1969. *Glubokaiapropitka drevesiny putem primeneniia naklov*, 2.ed. Moskva.

BAIER, J., TÝN, Z. *Ochrana dřeva*. 2.vyd. Praha: Grada, 2001, 93 s. ISBN 80-247-0050-6.

BRABEC, M., TIPNER, J., SEBERA, V., MILCH, J., RADEMACHER, P. *Standard and non-standard deformation behaviour of European beech and Norway spruce during compression*. *Holzforschung*, 69(9), 2015, pp. 1107-1116.

DÖMÉNY, J. *Změna permeability nepravého jádra bukového dřeva.*, Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2012, 83 s.

HAFÝZOĞLU, H., 1987. *Wood Material Impregnation Technique, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi Ders Notları*, Trabzon.

HÁJEK, M. *Mikrovlny v akci*. Ústav chemických procesů AV ČR, 2008, 12 s.

HE, S., LIN, L., FU, F., ZHOU, Y., FAN, M. *Microwave treatment for enhancing the liquid permeability of Chinese fir*. *BioResources* 9 (2). 2014. pp. 1924-1938. ISSN: 1930-2126

HORÁČEK, P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.*, 2. vyd. Brno MZLU, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

GRYC, V., HORÁČEK, P.: *Resin canals in spruce (Picea abis /L./ Karst.) with the occurrence of reaction wood*. *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.*, 2005, LIII, No. 1, pp. 85-92

KLEMENT, I., RÉH, R., DETVAJ, J. 2010. *Základné charakteristiky lesných drevín*. NLC Zvolen, 2010, 82 s, ISBN 978-80-8093-112-4.

KOLLMANN, F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer – Verlag, 1951, 1050 s.

KURJATKO, S., REINPRECHT, L. *Transport látok v dreve*. Zvolen: VŠLD, 1993. ISBN 80-228-0307-3.

LAVERS, G. M. *The strength properties of timber*. Watford, 1993. 60 s.

LEWIN, M., GOLDSTEIN S. I. *Wood Structure and Composition*. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991, 14488 s. ISBN 0-8247-8233-x.

LUKÁŠEK, J. *Posouzení variability vybraných vlastností dřeva jedle obrovské (*Abies grandis* (Douglas) Lindl.) z oblasti Černokostelecka*, Disertační práce, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012, 138 s.

MACLEAN, J. D. *Preservative treatment of wood by pressure methods*. Washington: U. S. Govt. Print. 1953. Off.j.

MATOVIČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*, Brno: MZLU, 1993, 212 s.

MECHANICAL WOOD PRODUCTS BRANCH: *Wood preservation manual*, Rome: FAO, 1986, 152 p, ISBN 92-5-102470-7

MELCHER, E., ZWIEFELHOFER, J. *Investigations concerning liquid absorption of six heartwood species*. In: Proceedings IRG Annual Meeting. Stockholm: IRG Secretariat, 2013, pp 1-13

NASSWETTROVÁ, A. -- NIKL, K. 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 ilviculturae Mendeliana Brunensis*. 2011. sv. 1/2011, č. 1/2011, s. 173--181. ISSN 1211-8516.

- PASERIN, V. *Impregnácia dreva smreka a jedle*. Bratislava: ŠDVÚ, 1970. 26 s.
- PAŘIL, P. *Wood impregnation*. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, 2016. 131 s.
- PÁNEK, M., REINPRECHT, L. *Bacillus subtilis for improving spruce wood impregnability*, BioRes. 6(3), 2011. 2912-2931
- PÁNEK, M., REINPRECHT, L., MAMOŇOVÁ, M. 2013. *Trichoderma viride for improving spruce wood impregnability*. In: BioResources 8(2), s. 1731--1746, ISSN: 1930-2126
- PERELYGIN, L. *Náuka o dreve*. 1.vyd. Bratislava: SVTL, 1960, 385 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda a.s., 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4
- PTÁČEK, P. *Ochrana dřeva*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 95 s. ISBN 978-80-247-2326-6.
- RAISANEN, T., ATHANASSIADIS, D. *Basic Chemical Composition of the Biomass Components of Pine, Spruce and Birch*. 2013
- REINPRECHT, L. *Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita, 2008, 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- REINPRECHT, L. *Effect of natural conservation substances on some moisture and mechanical properties of decayed spruce wood*. Slovakia: Technical University of Zvolen. Faculty of Wood Science and Technology, 8 s. 2010
- ROWELL, Roger M., ed. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013. ISBN 9781439853818.

SCHÁNĚL, L. *Mikrovlonné technologie*, Cultural service s.r.o. [online] Dostupný z WWW: [http://cultural-service.cz/pdf/mikrovlonna-technologie.pdf/](http://cultural-service.cz/pdf/mikrovlonna-technologie.pdf), 2003.

SVATONĚ, J., 2000. *Ochrana dřeva*, 1. vyd. Brno MZLU, 203 s. ISBN 80-7157-435-x.

ŠEFCŮ, OD., VINAŘ, J., PACÁKOVÁ, M.: *Metodika ochrany dřeva*. Odborné a metodické publikace. Praha: Jalna, 2000. 66 s. ISBN 80-86234-14-2.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ L. *Stavba dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2001, 187 s. ISBN 80-7157-636-0.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva*. Brno: MZLU, 2002. 187 s. ISBN 80-7157-636-0.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ L. *Stavba dřeva: cvičení*. 1.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004, 129 s. ISBN 80-7157-400-7.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ L., HORÁČEK, P. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. /. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008, 176 s. ISBN 80-7157-577-1.

TJOELKER, M. G., BORATYŃSKI A., BUGAŁA, W. *Biology and ecology of Norway spruce*. Dordrecht: Springer, 2007, 469 s. ISBN 978-1-4020-4840-1.

TREU, A., RIECHE, H., MILITZ, H. *Spruce and pine heartwood treatment by means of microwave radiation*. International Research Group on Wood Protection. 39th Annual Meeting, Istanbul, Türkiye 2008. 08-40411

TORGOVNIKOV, G.I., VINDEN, P. *New MW Technology and Equipment for Wood Modification*. (Conference paper). November 7-12, 2003, Austin, USA, Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. Book of Proceedings: "Microwave and Radio Frequency Applications", 2004. pp. 91-98

TORGOVNIKOV, G.I., VINDEN, P. *New 300 kW Plant for Microwave Wood Modification*. (Conference paper). August 9-11, Boston, USA, 40th Annual International Symposium, Proceedings, 2006. pp. 260-263

TORGOVNIKOV, G., VINDEN, P. *Main aspects of microwave wood modification applicable to the timber industry*. Global Congress on Microwave Energy Applications, 2008.

TORGOVNIKOV, G.I., VINDEN, P. *High intensity microwave wood modification for increasing permeability*. Forest Products Journal, 2009. pp. 84-92

TORGOVNIKOV, G., VINDEN, P. *Microwave Wood Modification Technology and Its Applications*. Forest Products Journal: March 2010, Vol. 60, No. 2, pp. 173-182.

ÚRADNÍČEK, L., CHMELARŤ, J. *Dendrologie lesnická*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-7157-162-8.

WAGENFÜHR, R. *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik – Identifizierung – Nomenklatur – Mikrotechnologie*. 5. Aufl. /. Leinfelden-Echterdingen: DRW Verlag, 1999. ISBN 3-87181-351-6.

WAGENFÜHR, R. *Holzatlas*. 5. Aufl. /. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2000, 707 s. ISBN 3-446-21390-2.

YILDIZ, S., CANAKCI, S., YILDIZ, U. C., OZGENC, O., AND TOMAK, E. D. *Improving of the impregnability of refractory spruce wood by Bacillus licheniformis pretreatment*, BioRes. 2012. 565-577.

Použité normy:

ČSN EN 350-1: *Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Část 1: Návod na zkoušení a klasifikaci přirozené trvanlivosti dřeva*.

ČSN EN 350-2: *Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přírozená trvanlivost rostlého dřeva. Část 2: Přírozená trvanlivost a impregnovatelnost vybraných dřevin důležitých v Evropě*

Internetové zdroje:

Bochemie – ochranný prostředek [online] [cit. 2017-3-14]. Dostupné na: <http://www.bochemie.cz/sites/default/files/dokumenty/technicky_list_bochemit_forte_profi_www.pdf>

Cultural-servise [online] [cit. 2017-02-16]. Dostupné na: <<http://www.cultural-service.cz/>>

Dřevaři humlák – HU dřeva, [online] [cit. 2017-01-05]. Dostupné na: <http://drevari.humlak.cz/data_web/HUdreva/9.pdf>

Elektromagnetické spektrum, [online] [citování 2017-02-20]. Dostupné na: <<http://www.mykos.cz/bezpecnost-mikrovlny/>>

Impregnace Soběslav, [online] [cit. 2017-2-10]. Dostupné na: <http://www.impregnacesobeslav.cz/storage/cb4de4b7-produkty_drevene_sloupy_impregnovane.pdf. >

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, [online] [cit. 2017-1-24]. Dostupné na: <http://nil.uhul.cz/data/documents/vysledky_projektu_nil2/zastoupeni_drevin_lp_cerven_2016.pdf>

VAVRČÍK et al., 2002. *Anatomická stavba dřeva – lexikon dřev*

[online] [cit 2017-05-3]. Dostupné na: <http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=sm>