

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Vliv počáteční vlhkosti dřeva smrku na příjem ochranného prostředku  
podtlakově-přetlakovou impregnací

Bakalářská práce



### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci: Vliv počáteční vlhkosti dřeva smrku na příjem ochranného prostředku podtlakově-přetlakovou impregnací zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně, dne

.....

podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Baarovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Petru Pařilovi za ochotu věnovat mi čas při konzultacích, poskytnutí věcných rad a připomínek při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich podporu během mého studia na Mendelově univerzitě v Brně.

## **Abstrakt**

Jméno: Ivo Novák

Název: Vliv počáteční vlhkosti dřeva smrku na příjem ochranného prostředku podtlakově-přetlakovou impregnací

Bakalářská práce se zabývá vlivem počáteční vlhkosti dřeva smrku ztepilého (*Picea abies*) na příjem a průnik ochranného prostředku podtlakově-přetlakovou impregnací.

Podstatou této práce je stanovení ideální počáteční vlhkosti dřeva při ošetření vodou ředitelným ochranným prostředkem Bochemit FORTE PROFI, při použití impregnační metody Bethell.

Po zpracování výsledků bylo zjištěno, že příjem impregnace se zvyšuje při vyschnutí dřeva pod hodnotu 10% vlhkosti a při mezi hygroskopicity dřeva. Naopak průnik dosahuje největší hloubky u vlhkosti 60 % a čerstvého dřeva.

Z dosažených výsledků vyplývá, že vlhkost dřeva má vliv na průběh a kvalitu výsledné impregnace.

Klíčová slova: smrk, příjem, průnik, vlhkost, impregnace

## **Abstract**

Name: Ivo Novak

Title: The impact of the initial wood moisture of the spruce wood on the uptake of the preservation agent

The bachelor thesis deals with the impact of the initial wood moisture content of the spruce wood (*Picea abies*) on the uptake and the depth of penetration of the preservation agent using pressure-vacuum impregnation.

The aim of the thesis is the determination of the optimal initial wood moisture content of the spruce wood samples treated by impregnation agent Bochemit FORTE PROFI using Bethell method.

Based on the results the level of intake of the preservation agent is higher when the wood moisture is decreased under 10 % or at the fiber saturation point of wood. On the contrary, the penetration is deepest in samples with 60 % wood moisture content and in the fresh wood.

According to the results the initial wood moisture of the wood has an impact on the impregnation process and final quality of impregnation.

Key words: spruce, intake, penetration, wood moisture, impregnation

# OBSAH

1	ÚVOD .....	9
2	CÍL PRÁCE .....	10
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED .....	11
3.1	Impregnace dřeva.....	11
3.1.1	Důvody impregnace dřeva .....	11
3.1.2	Způsoby impregnace dřeva .....	12
3.1.3	Chemické složení ochranných látek .....	12
3.2	Impregnovatelnost .....	13
3.2.1	Kvalifikace impregnovatelnosti .....	13
3.3	Vlivy na impregnovatelnost.....	14
3.3.1	Vliv vlhkosti na příjem látky .....	14
3.3.2	Viskozita .....	15
3.4	Stavba dřeva.....	15
3.4.1	Mikroskopická stavba smrkového dřeva .....	15
3.5	Propustnost.....	16
3.5.1	Obecná charakteristika propustnosti .....	16
3.5.2	Specifická propustnost .....	16
3.6	Proudění kapaliny ve dřevě.....	17
3.6.1	Způsob pohybu kapalin.....	17
3.7	Typy impregnačních podtlakově-přetlakové metody impregnace .....	17
3.7.1	Metoda plného nasycení buněk Bethell .....	17
3.7.2	Metoda úsporným způsobem podle Rüpinga.....	18
3.8	Vliv tlaku .....	19
3.8.1	Vnější tlak .....	19
3.8.2	Autoklávní (vnější) tlak .....	19
3.8.3	Kapilární tlak .....	19
4	MATERIÁL A METODIKA.....	20
4.1	Zkušební vzorky .....	20
4.2	Impregnační prostředek .....	20
4.3	Impregnační autokláv .....	21
4.4	Použité přístroje a pomůcky .....	21
4.5	Metodika experimentu .....	22
4.5.1	Výroba zkušebních vzorků .....	22
4.5.2	Sušení vzorků.....	22
4.5.3	Změření vzorků.....	23
4.5.4	Průběh přetlakově-podtlakové impregnace .....	23
4.5.5	Převážení impregnovaných vzorků.....	23
4.5.6	Změření hloubky průniku a míry proimpregnování .....	24
4.5.7	Zpracování naměřených výsledků .....	24
4.6	Výpočtové metody .....	25
5	VÝSLEDKY .....	26
5.1	Šířka běli v rámci kmenů .....	26
5.2	Příjem impregnační látky .....	27
5.3	Hloubka průniku impregnační látky .....	29
5.4	Míra proimpregnování .....	32
5.5	Příjem koncentrované látky pro proimpregnovanou část .....	34

6	DISKUZE .....	35
6.1	Příjem impregnační látky .....	35
6.2	Hloubka průniku .....	36
6.3	Míra proimpregnování vzorků .....	37
6.4	Příjem koncentrované látky vztažený pouze na proimpregnovanou část .....	38
7	ZÁVĚR .....	39
8	CONCLUSION .....	40
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	41
9.1	Knihy a odborné publikace .....	41
9.2	Normy ČSN .....	41
9.3	Internetové portály .....	42
10	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	43
11	SEZNAM TABULEK .....	44



# 1 ÚVOD

Dřevo je přírodní materiál, který se vyznačuje mnoha výbornými vlastnostmi, jež ho vynesly mezi nejoblíbenější konstrukční materiály. Ze dřeva jsou montovány domy, krovy, mosty, vyrábějí se z něj hračky, nábytek, luxusní šperky, doplňky do interiérů a jiné věci.

Mezi jeho výborné vlastnosti patří: nízká objemová hmotnost, fyzikálně-mechanické vlastnosti, tepelná izolace, lehká opracovatelnost, jednoduché spojování pomocí spojovacích prvků a v neposlední řadě jeho nízká uhlíková stopa.

Stejně jako má své výhody, má dřevo i své negativní vlastnosti jako jsou: anizotropie, vady dřeva (trhliny, suky), nízká odolnost vůči biotickým a abiotickým činitelům.

Většinu nevýhod již člověk dokázal pomocí kvalitní ochrany dřeva překonat. Například pomocí jednoduché konstrukční ochrany dřeva jsme schopni chránit dřevo vůči negativním vlivům vody, ohně a částečně i proti biotickým škůdcům. V ideálních podmínkách může dřevo bez výrazného poškození sloužit desítky, stovky, ale i tisíce let.

Tam, kde nestačí ani konstrukční ochrana, přistupuje se k chemickému ošetření, při němž se využívá vlastností chemických sloučenin, které přímo nebo nepřímo hubí tyto škůdce dřeva a prodlužují životnost dřevěných výrobků. Při této ochraně se využívá již zjištěných skutečností o ideálním příjmu látky nebo hloubce průniku.

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo stanovit nejvhodnější vstupní vlhkost u těžce impregnovatelného dřeva smrku ztepilého (*Picea abies*) před impregnací, která povede k dostatečnému příjmu ochranného prostředku s nejvyšší hloubkou penetrace při použití podtlakově-přetlakové metody Bethell. Pro experiment je použita impregnace pro průmyslové použití Bochemit FORTE PROFI. Zjištěná data budou srovnána s údaji v literatuře.

## 3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

### 3.1 Impregnace dřeva

Chemická impregnace dřeva se používá k prodloužení životnosti dřeva. Můžeme ji rozčlenit na: biocidní (označujeme jako fungicidní nebo insekticidní), protipožární nebo voduodpudivou ochranu (Ptáček, 2009).

#### 3.1.1 Důvody impregnace dřeva

Dřevo je přírodní organická hmota a proto v prostředí se zvýšenou vlhkostí a teplotou podléhá rychlému procesu znehodnocení. Zvyšuje se pravděpodobnost napadení biotickými škůdci a tím snížení životnosti na 2 až 5 let. Použitím impregnace jsme schopni prodloužit životnost u takto ošetřených prvků až na 20 let (Paserin, 1971).

Znehodnocení dřeva může způsobit více faktorů: dřevokazný hmyz, dřevokazné houby či plíseň. Proto je vhodné se řídit podle typového označení, které říká, proti kterým biotickým škůdcům prostředek vykazuje účinnost (viz. Tab. 1).

Tab. 1 Typové označení podle ČSN 49 0600-1

F <sub>A</sub>	účinnost proti houbám třídy <i>Ascomycetes</i> (způsobující měkkou hnilobu)
F <sub>B</sub>	účinnost proti houbám třídy <i>Basidiomycetes</i>
I <sub>P</sub>	preventivně působí proti dřevokaznému hmyzu
B	účinnost proti houbám způsobujícím zamodránění
P	účinnost proti plísním
D	ošetřené dřevo může být vystaveno vlivu povětrnosti (bylo ověřeno polní zkouškou)
E	ošetřené dřevo může být zabudované v extrémních podmínkách v kontaktu se zemí nebo sladkou vodou
S	povrchový způsob aplikace
P	hloubkový způsob aplikace
SP	oba způsoby aplikace
1,2,3,4,5	třída ohrožení dřeva

Z tabulky vyplývá, že existuje 5 tříd ohrožení dřeva. Jedná se o specifický typ prostředí, ve kterém se dřevo vyskytuje a čím může být napadeno. Jednotlivé třídy ohrožení jsou:

Třída ohrožení 1 – dřevo, které se nachází v interiéru, nepřichází do styku se zemí. Vlhkost dřeva nikdy nepřekračuje 20 %. Dřevo může být napadeno jedině dřevokazným hmyzem.

Třída ohrožení 2 – dřevo nacházející se v interiéru, ale s vyšší okolní vlhkostí prostředí. Vlhkost dřeva může krátkodobě překročit i 20 %. Při zvýšení vlhkosti dřeva může dojít k napadení dřeva dřevozbarvujícími nebo dřevokaznými houbami, stejně jako v předchozí třídě ohrožení může dřevo být napadeno dřevokazným hmyzem. Chemická ochrana se používá jen ojediněle.

Třída ohrožení 3 – do této třídy se zařazuje dřevo, které se nachází v exteriéru. Jeho vlhkost je tedy vyšší než 20 % velmi často, ale je chráněné před povětrnostními vlivy a není ve styku se zemí. Umístění těchto prvků přispívá k možnosti napadení všemi biotickými škůdci. Je nutné provést chemickou ochranu s ohledem na možnost vyluhovatelnosti účinných látek.

Třída ohrožení 4 – veškeré dřevo, které se zahrnuje do této skupiny, je zatížené extrémními podmínkami. Dřevo je ve styku se zemí nebo sladkou vodou. Vlhkost přesahuje trvale 20 % a je tedy ohroženo veškerými typy dřevokazného hmyzu a hub. Chemická ochrana dřeva je prováděna přípravky, které nejsou vyluhovatelné vodou. Je nutné dbát vyšší pozornosti v místech kontaktu země - vzduch.

Třída ohrožení 5 – skupina, která se v České republice prakticky nevyskytuje, jelikož se jedná o trvalé působení mořské vody a koryšů (vypracováno podle normy ČSN EN 335-1).

### **3.1.2 Způsoby impregnace dřeva**

Impregnaci dřeva můžeme provádět za působení atmosférického tlaku, přetlaku nebo podtlaku. Technologie využívající atmosférický tlak jsou: máčení, postřik, máčení v impregnačních vanách, injektáž, difúze a další. Tyto metody jsou závislé na drsnosti povrchu, ploše, rozdílu koncentrací ve dřevě a kapilárního tlaku.

Impregnace založené na přetlaku a podtlaku se aplikují podle různých metod, které se od sebe liší (Paserin, 1983). Tyto metody jsou specifikovány v kapitole 3.6.

### **3.1.3 Chemické složení ochranných látek**

Ochranné přípravky založené na anorganických látkách mají nejdelší trvanlivost. Účinné látky v těchto přípravcích jsou např. kyselina boritá, oxid boritý, tetraboritan

sodný (borax) a další. Takto ošetřené dřevo nesmí přijít do styku s vodou, neboť se impregnace vyplavuje. Hodí se proto do interiéru. Jiné účinné látky na bázi mědi se neodpařují ani nemění své chemické složení.

V případě použití organických látek je doba ochrany závislá na stabilitě použité účinné látky, kterými jsou např.: propiconazol, IPBC, fenoxycarb nebo kvartérní amoniová sůl. U takto chráněných konstrukcí je tedy nutno provádět vizuální kontrolu vždy po 3-5 letech, pokud je dřevo chráněno. V případě použití v třídě ohrožení 3 a 4 je kontrolu nutno provádět minimálně po 2 letech (Ptáček, 2009).

## 3.2 Impregnovatelnost

Jednotlivé druhy dřeva jsou různě obtížně impregnovatelné.

### 3.2.1 Kvalifikace impregnovatelnosti

Jádrové dřevo je zpravidla přirozeně odolnější než běl, ale při použití impregnace bude průnik maximálně několik milimetrů. Bělové dřevo je v tomto ohledu výrazně vhodnější, protože u běli jsme schopni dosáhnout průniku i do několika centimetrů. Při přetlakově-podtlakové impregnaci se využívá přípravků na bázi mědi a to z důvodu lepší fixace na dřevo. Naimpregnované dřevo tedy získává zeleno-šedý odstín. Jak popisuje Tab. 2 níže, smrkové dřevo zařazujeme do třídy impregnovatelnosti 4, tedy dřevo extrémně obtížně impregnovatelné (Ptáček, 2009).

Tab. 2 Klasifikace impregnovatelnosti – 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 není obvykle možný, ale po 2 nebo 3 h tlakové impregnace lze dosáhnout u jehličnatých dřevin více než 6 mm bočního průniku a u listnatých dřevin průniku velkou částí dřeva
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 průnik, je minimální

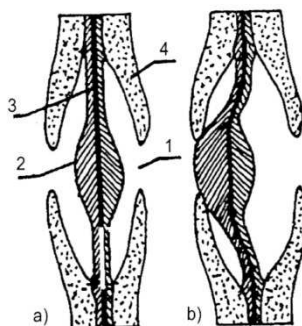
### 3.3 Vlivy na impregnovatelnost

#### 3.3.1 Vliv vlhkosti na příjem látky

Důležitý vliv na proimpregnovatelnost smrkového dřeva má rozhodně vlhkost daného dřeva. Při impregnaci čerstvého dřeva s roztoky založenými na bázi vody se využívá způsobů, které jsou založeny na difúzi a osmóze. Tyto způsoby impregnace jsou však zpravidla velmi časově náročné (Paserin, 1970).

Při zpracování dřeva se z technologického hlediska používá dřevo vysušené na určitou vlhkost. Při procesu sušení dřeva však nastává u jehličnatých dřevin uzavírání dvojteček, které zajišťují propojení jednotlivých tracheid ve dřevě. Nejčastěji se dvojtečky uzavírají při poklesu vlhkosti pod MH (Požgaj, 1997).

V těchto místech může dojít vlivem velkého gradientu tlaku při vysychání k vychýlení torusu, který je zavěšen na uzavírací blance (nazývané margo) do strany, a tím dochází k uzavření porusu. Povrch torusu a porusu je u smrku hladký a tedy při vychýlení torusu dochází k těsnému uzavření vodivé cesty. Uzavřením se výrazně snižuje schopnost pohybu vody a tedy i impregnovatelnosti smrkového dřeva, které je k tomuto jevu velmi náchylné (Gandelová, Šlezingerová, 2002).



Obr. 1 Schématické znázornění dvojtečky: a) otevřená, b) uzavřená (Reinprecht, 2008)

Vhodná vlhkost dřeva při použití vodorozpustných přípravků se pohybuje kolem 25-35%, což odpovídá hodnotě meze hygroskopicity, dále již MH. Maximální dosažitelný průnik impregnační látky do smrkového dřeva se pohybuje kolem hodnoty 3-7 mm hloubky průřezu. Při dosažení této hodnoty lze považovat impregnaci jako úspěšnou a dřevo je chemicky ošetřené. Nejčastější využití impregnace kulatinového sortimentu je při ošetření na rozmezí změny prostředí voda-zem, nebo voda-vzduch. Takto namáhané dřevo je dobré před vlastním chemickým ošetřením nejprve připravit. U smrkového případně douglaskového dřeva se doporučuje kulatinu mechanicky

upravit perforováním, tím se zvýší průnik i příjem impregnace. Na změnách zón se vyžaduje dosažení průniku impregnace min. 20 mm ([www. http://pilahuska.cz](http://pilahuska.cz)).

### **3.3.2 Viskozita**

Průnik impregnační kapaliny ulehčuje její nízká viskozita (řídke a dobře tekoucí látky). V případě látek s vyšší viskozitou je možné ji snížit pomocí zahřátí této kapaliny. Po zahřátí se viskozita této kapaliny sníží a průnik látky skrz dřevo je snazší a rychlejší.

Vlivem různých rychlostí šíření se kapaliny ve dřevě vznikají různé typy proudění: laminární, turbulentní a nelineární. Tyto druhy proudění závisí na Reynoldsově čísle. Tato veličina je typická pro stav proudění tekutiny a určuje, který typ proudění nastává. Z pohledu impregnace je důležitá hodnota označována jako kritické Reynoldsovo číslo  $Re_k = 2000$ . Při nižších hodnotách dochází k proudění laminárnímu a při vyšších hodnotách jak  $Re_k$  nastává turbulentní chování proudění kapalin (Kočí, 2003).

Při impregnaci dřeva by bylo nejvhodnější, kdyby se ve dřevě dosahovalo laminárního proudění. Vzhledem k poloměru a délce kapilár, které se ve dřevě většinou nacházejí (kromě jarních tracheid), je reálné dosažení tohoto typu proudění obtížné a k tomuto proudění téměř nedochází. V případě jehličnatého dřeva se setkáváme s nelineárním tokem, který je způsobený poklesem hybné síly (Reinprecht, 2008).

## **3.4 Stavba dřeva**

Dřevo jehličnanů se skládá z velkého počtu buněk, které jsou seskupené do jednotlivých pletiv podle typu zaměření.

Smrkové dřevo je bělové se zralým dřevem, přechod mezi zónami není po vysušení zřetelný. Dřevo se vyznačuje poměrně pozvolným přechodem mezi jarním a letním dřevem. Jsou viditelné pryskyřičné kanálky na radiálním a tangenciálním řezu. (Požgaj, 1997).

### **3.4.1 Mikroskopická stavba smrkového dřeva**

Smrkové dřevo je složeno ze dvou základních elementů. Jde o tracheidy, které převažují a v menším počtu parenchymatické buňky.

Tracheidy tvoří asi 90-95 % struktury dřeva, jsou orientované s podélnou osou kmene s uzavřeným, protáhlým a zašpičatělým tvarem. Rozdělujeme je na jarní a letní tracheidy. Jarní tracheidy mají především vodivou funkci. Vyznačují se tenkou buněčnou stěnou, vznikají na začátku vegetačního období a tvoří jarní dřevo letokruhů.

Letní tracheidy mají funkci mechanickou. Mají tlustou buněčnou stěnu a vznikají později než jarní tracheidy, tvoří letní dřevo. Smrkové dřevo tvoří také horizontální tracheidy, které jsou orientované kolmo na osu kmene a jsou součástí dřeňových paprsků (Kurjatko, Reinprecht, 1993).

Parenchymatické buňky jsou druhým typem elementů v jehličnatém dřevě. Zastupují převážně funkci zásobní, tvoří pryskyřičné kanálky, dřeňové paprsky a podélný dřevní parenchym (Gandelová, Šlezingerová, 2002).

Pryskyřičné kanálky tvoří síť vertikálních a horizontálních kanálků.

### 3.5 Propustnost

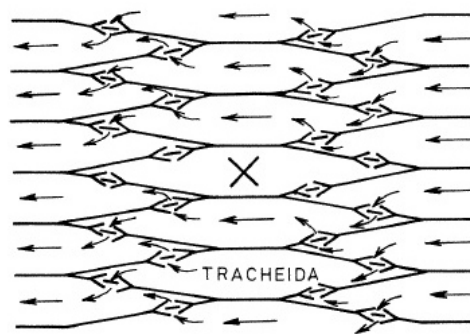
#### 3.5.1 Obecná charakteristika propustnosti

Propustnost dřeva je velmi variabilní veličina jak v rámci druhu, tak i v rámci jednoho stromu. Závisí na počtu a velikosti vodivých elementů a jejich vzájemném propojení. Pro jehličnaté dřeviny je propustnost dána počtem a poloměrem dvojteček (Požgaj a kol., 1997). Velmi nízká propustnost jehličnatých dřevin způsobuje problémy během sušících procesů, problémy s pařením, vařením a potíže s impregnací ochranných látek do dřeva (Kurjatko a kol., 1993).

#### 3.5.2 Specifická propustnost

Výpočet koeficientu specifické propustnosti lze také vyjádřit pomocí kapilárních modelů:

- Model jednotlivých válcových kapilár: typický pro výpočty u listnatých dřevin a průniku látek přes čela vzorků.
- Comstockův model: používaný pro tok látek v jehličnatých dřevinách. Myšlenkou je, že se propustnost  $K$  zvyšuje s větším počtem vodivých cest na jednotce plochy.
- Model zmenšených aktivních ploch a délky dřeva je založený na principu, že se aktivní plocha vodivých cest exponenciálně snižuje s délkou transportního toku. Tento model je i základem několika navržených modelů dřeva např: modelu Höslího a Orfilu (1985) nebo modelu Reinprechta (1993), který vychází ze vzájemné propojenosti kapilár (Reinprecht, 2008).



Obr. 2 Vodivé cesty ve dřevě jehličnanů (Požgaj, 1997)



### **3.6 Proudění kapaliny ve dřevě**

Dřevo je složitý heterogenní materiál skládající se ze systému kapilár, který zajišťuje distribuci vody se živinami pomocí transpiračního proudu. Tento jev je hlavní hybnou jednotkou pohybu vody jak v živém stojícím stromě, tak ve dřevě zpracovaném pořezem (ochrana dřeva pomocí impregnačních látek). Pohyb tekutiny zapříčiňuje gradient tlaků nebo chemické síly v závislosti na fázovém stavu vody (Požgaj a kol., 1997).

#### **3.6.1 Způsob pohybu kapalin**

Ve dřevě se tekutiny nacházejí ve dvou skupenstvích (kapaliny a plyny). Tyto dvě skupenství se pohybují přes dřevo dvěma rozdílnými způsoby: objemovým tokem a molekulárním tokem.

Objemový tok představuje transport kapaliny neboli vody volné skrz anatomické elementy buněk dřeva, které jsou propojeny do dlouhých vodivých cest. Tento způsob pohybu kapalin se využívá při impregnaci dřeva převážně za zvýšeného tlaku vzduchu (přetlaku). Molekulární tok lze definovat jako proudění vody vázané, ale v plynné formě (Horáček, 2008).

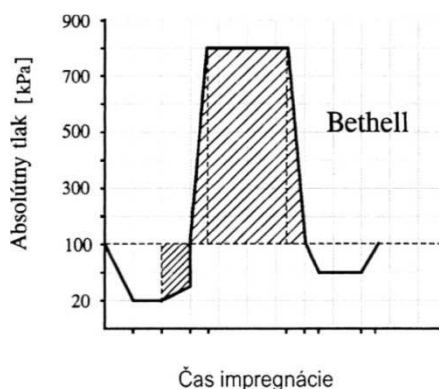
### **3.7 Typy impregnačních podtlakově-přetlakové metody impregnace**

Pro nejúčinnější impregnaci dřeva se v praxi využívá metod s kombinací sníženého a zvýšeného tlaku vzduchu. Při těchto způsobech ochrany dřeva je zapotřebí speciálních impregnačních zařízení, jejichž základem jsou tlakový kotelný, vývěva a kompresor. Jednotlivé impregnační metody se liší v jednotlivém střídání fází tlaku, vakua a použitých časových intervalech. Při impregnační technologii využívající snížený a zvýšený tlak (podtlakově-přetlaková impregnace) se při přenosu využívají jako hybné vnější tlakové síly. Podtlakově-přetlaková impregnace je účinnější než vakuová impregnace a používá se pro těžce impregnovatelné dřevo např. smrky a pro impregnaci do plného nasycení buněk (Kučerová, 2011).

#### **3.7.1 Metoda plného nasycení buněk Bethell**

Tento způsob je jeden z několika možných způsobů, jak lze provádět podtlakově-přetlakovou metodu impregnace. Metoda Bethell se používá pro obtížně impregnovatelná dřeva. Tato metoda je specifická tím, že po zavezení materiálu do

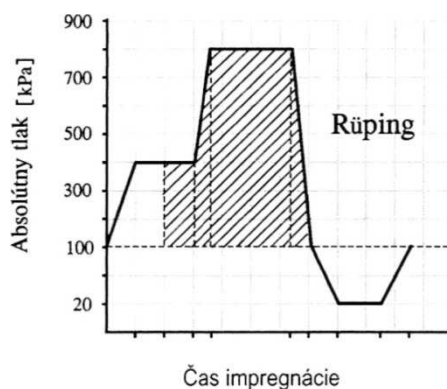
impregnačního kotle a důkladném uzavření, se vyvine pomocí vývěvy mírný podtlak, který zajistí ještě vyšší příjem impregnačního prostředku. Následně je vyvinut přetlak přibližně 850 kPa. Po uplynutí daného času je opět vyvinut podtlak. Při této metodě je dosahováno vysoké spotřeby impregnační látky (Reinprecht, 2008), protože dochází k úplnému nasycení buněk dřeva. Tato metoda impregnace bude více rozvedena v kapitole č. 4 – Metodika.



Obr. 3 Impregnační způsob metodou Bethell (Reinprecht, 2008)

### 3.7.2 Metoda úsporným způsobem podle Rüpinga

Impregnace pomocí metody podle Rüpinga se liší od Bethellovy metody tím, že v počáteční fázi procesu není počáteční vakuum. Využíváme ji u lehce impregnovatelného dřeva nebo jestliže vyžadujeme ekonomičtější způsob impregnace. Tato metoda bývá často cyklována. Impregnace tímto způsobem je velmi rozšířená například díky polovičnímu množství spotřeby ochranné látky (Reinprecht, 2008).



Obr. 4 Impregnační způsob metodou Rüping (Reinprecht, 2008)

## 3.8 Vliv tlaku

### 3.8.1 Vnější tlak

Hlavní vnější hnací silou pro prostup kapalin skrz dřevo je tlakový gradient. Zvýšením nebo snížením tlaku v okolí dřeva docílíme tzv. gradientu tlaku, který má za následek významné urychlení pohybu kapalin v anatomické struktuře dřeva. V případě sníženého tlaku je gradient určen rozdílem atmosférického a sníženého tlaku podle:

$$d_p = \frac{p_0 - p}{p_0}$$

$p_0$  - atmosférický tlak,  $p$  - snížený tlak pomocí vakua.

Na rozdíl od sníženého tlaku se při aplikaci zvýšeného tlaku dosahuje rychlejšího pronikání kapalin skrz dřevo, což je způsobeno tím, že vzniká vyšší tlakový gradient.

### 3.8.2 Autoklávný (vnější) tlak

Typický tlak, který se vytváří při podtlakově-přetlakových metodách v impregnačních kotlech.

### 3.8.3 Kapilární tlak

Kapilarita je fyzikální jev, který je označován také jako kapilární jevy, vznikající na rozmezí kapalné a pevné látky v úzkých kapilárách důsledkem působení povrchového napětí v kapalině. Poukazuje na nerovnováhu mezimolekulárních sil v objemu a na povrchu kapaliny. Pomocí povrchového napětí je kapalina schopna vystoupat vysoko po stěně jednotlivých úzkých kapilár (kapilární elevace). Vzlínání se zastaví až při vyrovnání hydrostatické síly (tíhou kapalinového sloupce) a kapilární síly (Kočí a kol., 2003).

$$h = \frac{2 * \sigma * \cos\theta}{r * \rho_{vody} * g} \text{ [mm]}$$

$\sigma$  – povrchové napětí (N/m),  $\rho$  – hustota kapaliny ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $\theta$  – úhel smáčení,  $r$  – poloměr kapiláry (m),  $g$  – gravitační zrychlení ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )

Z rovnice můžeme v praxi vypočítat výšku vzlínivosti, o kterou kapalina vystoupá, nebo pomocí ní lze určit povrchové napětí kapaliny.

## 4 MATERIÁL A METODIKA

### 4.1 Zkušební vzorky

Pro tuto práci bylo použito dřevo smrku ztepilého - *Picea abies*. Tato dřevina byla zvolena z důvodů nejčastějšího využití pro výrobu palisád a sloupů. Také se jedná o nejčastěji používanou dřevinu pro dřevařské zpracování v českém dřevozpracujícím průmyslu a je známa svojí špatnou impregnovatelností při vzduchosuchém a vysušeném stavu.

### 4.2 Impregnační prostředek

Přípravek Bochemit Forte Profi je určený pro průmyslovou preventivní ochranu dřeva před biotickými škůdci dřeva. Díky chemickému složení se jedná o vodou nevyluhovatelný koncentrát a tedy dlouhodobou ochranu stavebních konstrukcí, sloupů a pro dřevo ve styku se zemí nebo sladkou vodou - 4. třída ohrožení. Dřevo po aplikaci získává zelený nebo hnědý odstín.

Přípravek je určený pro vakuo-tlakovou impregnaci dřeva.

Přesné typové označení chemické impregnace Bochemit FORTE PROFI podle normy ČSN 49 0600-1 je podle výrobce: F<sub>A</sub>, F<sub>B</sub>, P, I<sub>P</sub>, 1, 2, 3, 4, E, SP.

Z chemického hlediska se jedná o vodou ředitelný přípravek na bázi mědi, s nízkou dynamickou viskozitou, který zaručuje rychlý průnik prostředku do dřeva. Hlavní účinné látky tohoto přípravku jsou: dihydroxid-uhličitan měďnatý (20%), tebuconazol (0,3%) a propiconazol (0,3%).

Tab. 3 Doporučené koncentrace pracovních roztoků a minimální příjmy Bochemitu FORTE PROFI ([www.bochemie.cz](http://www.bochemie.cz))

Třída použití ČSN EN 335-1	Ředění přípravku Bochemit:voda	Příjem dle ČSN EN 599-1 proimpregnovaná zóna	Metoda aplikace
Interiér (1)	1:99	7 kg/m <sup>3</sup>	tlakovakuová impregnace
Interiér (2)	1:99	7 kg/m <sup>3</sup>	tlakovakuová impregnace
Exteriér (3)	1:99 -1:49	9 kg/m <sup>3</sup>	tlakovakuová impregnace
Exteriér, země, voda (4)	1:49 - 1:25	14 kg/m <sup>3</sup>	tlakovakuová impregnace

### 4.3 Impregnační autokláv

Přetlakově-podtlaková impregnační jednotka nacházející se ve výzkumném centru Mendelovy univerzity v Útěchově je vyrobena z nerezové oceli. Zásobní nádrž je místem, ve kterém se shromažďuje impregnační látka, pokud není přístroj v provozu. Vakuové čerpadlo je jedna ze dvou nezbytných součástí přetlakově-podtlakového impregnačního zařízení. Vakuové čerpadlo je běžná vývěva, která pracuje pomocí membrány, která odsává z potrubí vzduch a vytváří podtlak. Vzduchový kompresor je druhá nezbytná součást impregnační linky, vytváří v soustavě na rozdíl od vývěvy přetlak. Kompresor je propojen s tlakovou nádobou (vzdušníkem). Ten má za úkol vyrovnávat výkyvy tlaku v potrubí a impregnačním kotli. Impregnační kotel je válcová nádoba, kde proniká impregnační látka do dřeva. Veškeré součásti autoklávu jsou propojeny tlakovým potrubím a řízené pomocí elektronické řídicí jednotky.



Obr. 5 Impregnační autokláv

### 4.4 Použité přístroje a pomůcky

- motorová pila, svinovací metr, poříz, lihový fix
- pásová pila
- čelní bruska
- klimatizační zařízení
- digitální posuvné měřítko MITUTOYO Absolute
- digitální laboratorní váha s přesností na 0,01kg
- elektrický vaříč, kádinky, exsikátor

## 4.5 Metodika experimentu

### 4.5.1 Výroba zkušebních vzorků

Jednotlivé stromy, resp. kmene byly vytipovány podle náležitých hledisek kvality. Nežádoucími vadami zde byly: hniloba v rámci kmene, přílišná křivost a jiné vady kmene. Pokácené kmene stromů byly rozřezány na výřezy o délce 1 m. Jednotlivé kmene byly popsány a veškerá čela byla důkladně zabalena do mikrotenové fólie. Tímto se zamezilo intenzivnímu vysušování dřeva z čelních ploch. Dalším krokem při zpracování bylo důkladné odstranění kůry z veškerých kmenů pomocí pořízu. Odkorněná kulatina byla následně vizuálně zkontrolována na přítomnost vad, které by negativně ovlivňovaly pokus. Následovalo rozřezání na pásové pile, kde tloušťka jednotlivých zkušebních vzorků byla stanovena na 10 cm. Čela nařezaných vzorků se obrousila na čelní brusce a pro názornost se tužkou zvýraznil přechod bělové a vyžralé části.



Obr. 6 Zkušební vzorek před sušením

### 4.5.2 Sušení vzorků

Před samotným procesem impregnování dřeva bylo potřeba upravit veškeré zkušební vzorky. Jednotlivé skupiny vzorků byly označeny podle vstupní vlhkosti do impregnace. Každou vlhkostní skupinu zastupoval jeden vzorek z každého kmene. Písmeno u vzorku tedy představuje vždy určitou skupinu vlhkosti vzorků - viz Tab. 4.

Tab. 4 Označení jednotlivých skupin vzorků

A	B	C	D	E	F
0%	10%	MH	40%	60%	80 % a více

Po zkompletování těchto skupin se přistoupilo k sušení na požadované vlhkosti. Úprava vlhkosti dřeva byla prováděna v sušárně a v klimatizačním zařízení při určité relativní vlhkosti vzduchu (RVV), která odpovídá dané rovnovážné vlhkosti dřeva (RVD).

Čela vysušených vzorků vyjmutých ze sušárny případně klimatizační jednotky byla zatřena pomocí dvousložkového epoxidového laku Epolex. Tento nátěr způsobil, že se uzavřely vodivé cesty na příčných řezech. Postupovalo se podle návodu od výrobce laku. Po zatření čel a důkladném vytvrzení laku se zamezilo dřevu příjmu ochranné látky z čelních ploch.

#### 4.5.3 Změření vzorků

Veškeré vzorky se zvážili na digitální váze s přesností na 0,01 kg ( $m_1$ ). Byly změřeny průměry vzorků – kuláčů pomocí určení průměrné hodnoty ze 3 – 4 měření na různých místech jednotlivých vzorků. Stejně tak se postupovalo při měření tloušťky vzorků.

#### 4.5.4 Průběh přetlakově-podtlakové impregnace

Ochranný koncentrovaný prostředek byl naředěn vodou podle doporučení uvedeného výrobcem. V našem případě jsme postupovali podle Bethellovy metody. Pomocí vakuového čerpadla se snížil tlak o 80 kPa. Doba této podtlakové fáze trvala 90 minut. Po uplynutí dané doby byl zvýšen tlak na hodnotu přibližně 850 kPa. Působení přetlakové fáze trvalo 120 minut. Závěrečná fáze Bethellovy metody spočívala v opětovném snížení tlaku na 40 kPa a současného odčerpání impregnační látky. Pomocí podtlaku bylo ze dřeva odstraněno přebytečné množství ochranné látky z povrchových vrstev.

#### 4.5.5 Převážení impregnovaných vzorků

Vzorky se po vyjmutí z impregnačního kotle nejdříve otřely od přebytečného ochranného prostředku a zvážily na digitální váze ( $m_2$ ).

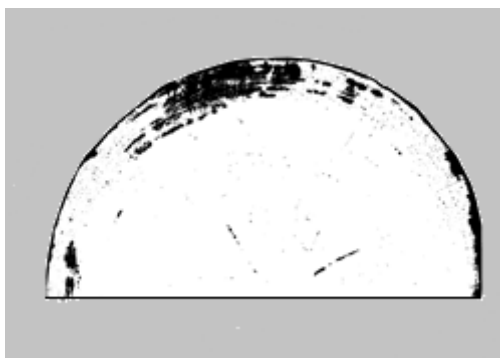
#### 4.5.6 Změření hloubky průniku a míry proimpregnování

Míra průniku byla stanovena tak, že se vyschlé vzorky rozřezaly v polovině jejich tloušťky na pásové pile.

Zkouška se provedla natřením vzniklých ploch po rozřezání roztokem ethanolu a dithiooxamidu o koncentraci účinné látky 0,5 %. Natřené vzorky byly vloženy na 10 minut do exsikátoru s hydroxidem amonným o koncentraci 25 %. Proimpregnovaná místa s výskytem mědi se po kontaktu s parami amoniaku zbarvila do tmavě modré barvy.

Pomocí digitálního posuvného měřítka se měřila hloubka průniku od vnější hrany vzorků až k místu změny zbarvení dřeva mezi zbarvenou částí.

Vzorky byly vyfotografovány v dostatečné kvalitě pro vyhodnocení míry proimpregnování v programu ImageJ. Snímky byly převedeny v programu na barevnou hloubku 8-bitů (šedá škála) a pomocí prahování (threshold) byla zvýrazněna pouze proimpregnovaná místa. Dále se změřila plocha proimpregnované části a celého kmene a z těchto ploch se spočítal poměr proimpregnované zóny.



Obr. 7 Výsledný kontrast mezi proimpregnovanou (černá) a neproimpregnovanou plochou

#### 4.5.7 Zpracování naměřených výsledků

Naměřené hodnoty se převedly do elektronické podoby v tabulkovém formátu Excel a zpracovaly se v analytickém programu Statistica. Bylo použito vícenásobného porovnání pomocí Kruskal-Wallisova testu pro posouzení statisticky významné nebo nevýznamné shody mezi pracovními soubory.



## 4.6 Výpočtové metody

Při zpracování naměřených výsledků byly použity následující vzorce:

- Příjem impregnační látky

Příjem impregnační látky se stanoví podle vzorce:

$$I = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

kde: I – příjem impregnační látky [kg·m<sup>-3</sup>]

m<sub>2</sub> – hmotnost zkušebních vzorků před impregnací [kg]

m<sub>1</sub> – hmotnost zkušebních vzorků po impregnaci [kg]

V – objem zkušebních vzorků

- Vlhkost dřeva

Vlhkost zkušebních vzorků se stanoví podle normy ČSN 49 0103.

$$w = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} * 100 \text{ [%]}$$

kde: w – je vlhkost zkušebního vzorku [%]

m<sub>1</sub> – je hmotnost zkušebního vzorku při určité vlhkosti [kg]

m<sub>0</sub> – je hmotnost absolutně suchého zkušebního vzorku [kg]

- Míra proimpregnování

Míra proimpregnování na příčném řezu se určí ze vztahu.

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

kde: S<sub>i</sub> – je proimpregnovaná oblast na řezu zkušebního vzorku [-]

S – je celková plocha řezu zkušebního vzorku [-]

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Šířka běli v rámci kmenů

Šířka běli má velký význam pro průběh a výsledek přetlakově-podtlakové impregnace dřeva. Jak můžeme vidět z Tab. 5, v experimentu jsme použili kmeny s proměnlivou šířkou běli od 13,5 mm až po 25,4 mm.

Tab. 5 Průměrná šířka běli u použitých kmenů

kmen	1	2	3	4	5
průměrná šířka běli [mm]	13,5	16,4	16,1	15,9	25,4

Různá šířka běli způsobuje ve výsledcích proměnlivost naměřených hodnot příjmu, průniku i míry proimpregnování. Hlavním důvodem je, že se impregnuje pouze bělová část kulatiny. Na Obr. 8 vidíme srovnání mezi největší a nejmenší šířkou běli.



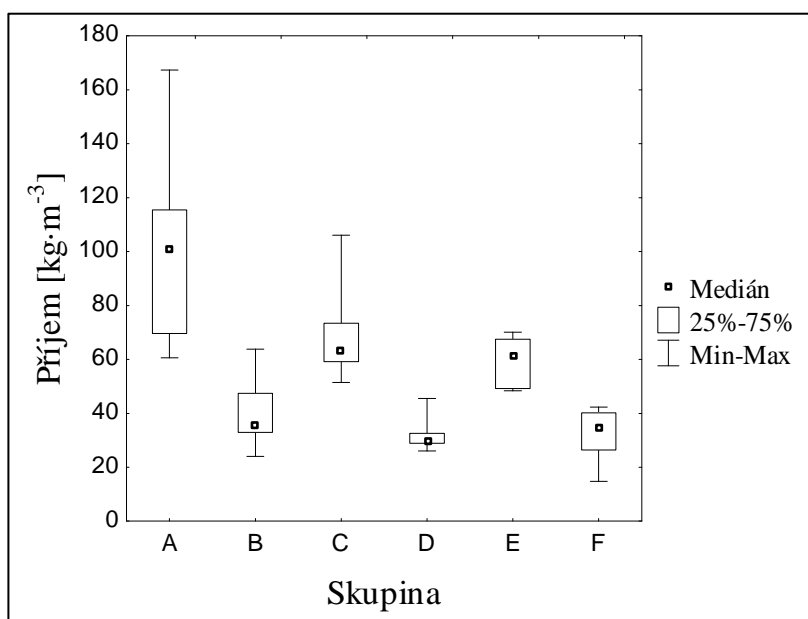
Obr. 8 Srovnání šířky běli mezi vzorky (vlevo: vzorek s největší šířkou běli, vpravo: vzorek s nejmenší šířkou běli)

## 5.2 Příjem impregnační látky

Popisná statistika pro příjem v Tab. 6 ukazuje, že nejvyšší průměrný příjem  $103 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  je ve skupině A, nejnižší příjem  $32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nastal ve skupině F. Nejvyšší naměřená hodnota je  $167 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a nejnižší příjem je  $15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Variační koeficienty se pohybují mezi 14 až 31 %.

Tab. 6 Popisná statistika příjmu impregnační látky pro jednotlivé vlhkostní třídy

	A	B	C	D	E	F
aritmetický průměr [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	103	39	71	32	60	32
medián [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	101	36	64	29	61	34
minimum [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	61	24	51	26	48	15
maximum [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	167	64	106	46	70	42
směrodatná odchylka [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	32	11	19	7	8	9
variační koeficient [%]	31	28	27	21	14	29



Obr. 9 Vliv vlhkosti na příjem impregnační látky

Z Obr. 9 vidíme, že dřevo smrku má nejvyšší příjem impregnační látky při vlhkosti blízké 0 %, kde jsme dosáhli průměrného příjmu přes  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Mírně zvýšený příjem se vyskytuje také při vlhkosti kolem MH a 60 %. Zde se průměrný příjem impregnační látky pohybuje kolem  $60 - 70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tab. 7 Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro příjem impregnační látky

Závislá: příjem	H (5, N = 50) = 38,17082; p=0,0000			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	Prům. pořadí
A	1	10	435,0000	43,50000
B	2	10	165,0000	16,50000
C	3	5	180,0000	36,00000
D	4	5	51,0000	10,20000
E	5	10	325,0000	32,50000
F	6	10	119,0000	11,90000

Tab. 7 obsahuje výsledky Kruskal-Wallisova testu pro příjem impregnační látky s výsledkem  $p=0,0000$ . Můžeme tedy říct, že jsme prokázali statisticky významný rozdíl v příjmu ochranného prostředku.

Tab. 8 Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro příjem ( $p < 0,05$  statisticky významný rozdíl,  $p > 0,05$  statisticky nevýznamný rozdíl)

Závislá: příjem	Kruskal-Wallisův test: H (5, N= 50) = 38,17082 p=0,0000					
	A R:43,500	B R:16,500	C R:36,000	D R:10,200	E R:32,500	F R:11,900
A		0,000517	1,000000	0,000456	1,000000	0,000019
B	0,000517		0,218926	1,000000	0,211746	1,000000
C	1,000000	0,218926		0,077034	1,000000	0,038117
D	0,000456	1,000000	0,077034		0,078342	1,000000
E	1,000000	0,211746	1,000000	0,078342		0,023674
F	0,000019	1,000000	0,038117	1,000000	0,023674	

Zhodnocením pomocí Kruskal-Wallisova testu jsme zjistili statisticky významný rozdíl v příjmu ochranné látky. V Tab. 8 vidíme, že skupina vzorků B a D se statisticky významně liší od skupiny A. Skupina F se statisticky významně liší od skupin vzorků A, C a E.

### 5.3 Hloubka průniku impregnační látky

Obr. 10 můžeme vidět hloubku průniku i míru proimpregnování při všech zkoumaných vlhkostech dřeva. Také je dobře pozorovatelné, že impregnace byla ovlivněna mikrotrhlinami a makrotrhlinami převážně v bělové části dřeva. U vyzrálé části dřeva vidíme, že ochranná látka pronikla výhradně velkými prasklinami.

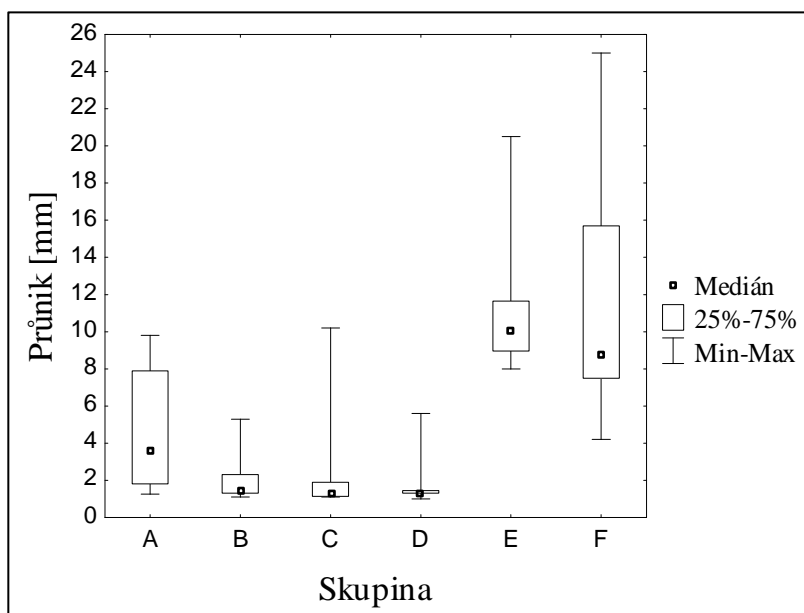


Obr. 10 Zkušební vzorky po impregnaci při různých vlhkostech: a)  $w = 0 \%$ , b)  $w = 10 \%$ , c)  $w = \text{MH}$ , d)  $w = 40 \%$ , e)  $w = 60 \%$ , f)  $w = 80 \%$  a více

Tab. 9 Statistické zhodnocení průniku impregnační látky

	A	B	C	D	E	F
aritmetický průměr [mm]	4,57	2,11	3,13	2,13	11,24	11,53
medián [mm]	3,60	1,48	1,30	1,32	10,10	8,80
minimum [mm]	1,25	1,10	1,10	1,00	8,00	4,20
maximum [mm]	9,80	5,30	10,20	5,60	20,50	25,00
směrodatná odchylka [mm]	3,04	1,27	3,55	1,74	3,73	6,40
variační koeficient (%)	66,44	60,14	113,52	81,50	33,18	55,52

Popisná statistika uvedená v Tab. 9 ukazuje, že největší průnik 11,53 mm je ve skupině F, naopak nejnižší 2,11 mm byl dosažen ve skupině B. Největší naměřená hodnota je 25,00 mm a nejnižší průnik je 1,00 mm. Variační koeficienty se pohybují mezi 33,18 % až 113,52 %.



Obr. 11 Vliv vlhkosti na průnik impregnační látky

Z Obr. 11 je vidět, že největší průnik impregnace do dřeva nastává při 60 a více procentech vlhkosti dřeva.

Při nižších vlhkostech se hloubka průniku výrazně snižuje, jak je vidět z Obr. 11 a pohybuje se průměrně do 3 mm. Hodnota mediánu ukazuje, že souvislá hloubka průniku impregnace u většiny vzorků nedosahuje ani 2 mm.

Tab. 10 Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro průnik

Závislá: průnik	H (5, N= 45) = 26,62940 p=0,0001			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	Prům. pořadí
A	1	10	225,5000	22,55000
B	2	10	139,0000	13,90000
C	3	5	70,0000	14,00000
D	4	5	56,5000	11,30000
E	5	8	300,5000	37,56250
F	6	7	243,5000	34,78571

Tab. 10 obsahuje výsledky Kruskal-Wallisova testu pro průnik s výsledkem  $p=0,0001$ . Můžeme tedy říct, že jsme prokázali statisticky významný rozdíl mezi zkoumanými skupinami v hloubce průniku.

Tab. 11 Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro průnik ( $p < 0,05$  statisticky významný rozdíl,  $p > 0,05$  statisticky nevýznamný rozdíl)

Závislá: průnik	Kruskal-Wallisův test: H (5, N= 45) = 26,62940 p=0,0001					
	A R:22,550	B R:13,900	C R:14,000	D R:11,300	E R:37,563	F R:34,786
A		1,000000	1,000000	1,000000	0,239469	0,880518
B	1,000000		1,000000	1,000000	<b>0,002186</b>	<b>0,018774</b>
C	1,000000	1,000000		1,000000	<b>0,024750</b>	0,103137
D	1,000000	1,000000	1,000000		<b>0,006785</b>	<b>0,033885</b>
E	0,239469	<b>0,002186</b>	<b>0,024750</b>	<b>0,006785</b>		1,000000
F	0,880518	<b>0,018774</b>	0,103137	<b>0,033885</b>	1,000000	

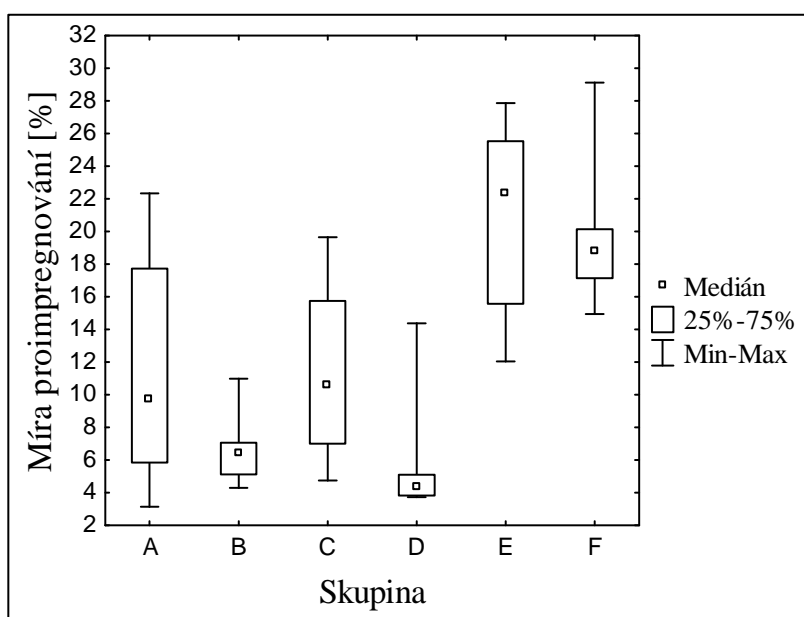
Zhodnocením pomocí Kruskal-Wallisova testu jsme zjistili statisticky významný rozdíl v hloubce průniku ochranné látky. V Tab. 11 vidíme, že skupiny vzorků E a F se statisticky významně liší od skupin B a D, navíc skupina E se ještě liší se skupinou B.

## 5.4 Míra proimpregnování

Popisná statistika v Tab. 12 ukazuje, že nejvyšší míra proimpregnování 20,85 % je ve skupině E, naopak nejnižší 6,27 % nastala ve skupině D. Nejvyšší naměřená hodnota je 29,12 % a nejnižší proimpregnování je 3,13 % plochy. Variační koeficienty se pohybují mezi 21,16 až 64,99 %. Musíme zde zmínit, že jsme nebyli schopni změřit veškerá místa proimpregnování.

Tab. 12 Statistické zhodnocení míry proimpregnování

	A	B	C	D	E	F
aritmetický průměr [%]	11,42	6,64	11,53	6,27	20,85	19,65
medián [%]	9,75	6,47	10,53	4,38	22,36	18,78
minimum [%]	3,13	4,30	4,74	3,72	12,05	14,94
maximum [%]	22,34	10,97	19,65	14,37	27,86	29,12
směrodatná odchylka [%]	6,57	2,01	5,50	4,08	5,56	4,16
variační koeficient [%]	57,58	30,33	47,69	64,99	26,65	21,16



Obr. 12 Vliv vlhkosti na míru proimpregnování

Z Obr. 12 je patrné, že nejvyšší průměrná míra proimpregnování vzorků nastala u skupiny E a čerstvě pokáceného dřeva, kde dosahuje 22,36 a 18,76 %. Dále vidíme, že míra proimpregnování dosahuje hodnoty 10% u dřeva úplně vysušeného a vlhkosti pohybující se kolem MH. U jiných vlhkostí se hodnoty snižují k 5% proimpregnování objemu.



Tab. 13 Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro míru proimpregnování

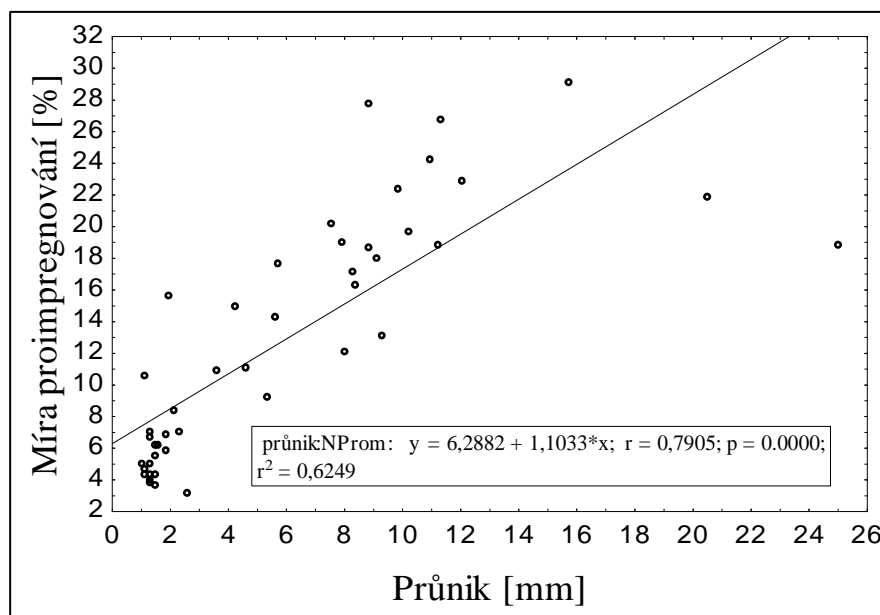
Závislá: procento	H (5, N= 45) = 24,33325 p=0,0002			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	Prom. Pořadí
A	1	10	209,0000	20,90000
B	2	10	136,0000	13,60000
C	3	5	111,0000	22,20000
D	4	5	47,0000	9,40000
E	5	8	290,0000	36,25000
F	6	7	242,0000	34,57143

Tab. 13 obsahuje výsledky Kruskal-Wallisova testu pro míru proimpregnování s výsledkem  $p=0,0002$ . Můžeme tedy říct, že jsme prokázali statisticky významný rozdíl ve velikosti proimpregnované plochy.

Tab. 14 Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro míru proimpregnování ( $p < 0,05$  statisticky významný rozdíl,  $p > 0,05$  statisticky nevýznamný rozdíl)

Závislá: procento	Kruskal-Wallisův test: H (5, N= 45) = 24,33325 p=0,0002					
	A R:20,900	B R:13,600	C R:22,200	D R:9,4000	E R:36,250	F R:34,571
A		1,000000	1,000000	1,000000	0,206153	0,519984
B	1,000000		1,000000	1,000000	0,004159	0,017923
C	1,000000	1,000000		1,000000	0,908875	1,000000
D	1,000000	1,000000	1,000000		0,005037	0,015957
E	0,206153	0,004159	0,908875	0,005037		1,000000
F	0,519984	0,017923	1,000000	0,015957	1,000000	

Zhodnocením pomocí Kruskal-Wallisova testu jsme zjistili statisticky významný rozdíl pro míru proimpregnování ochranným prostředkem. V Tab. 14 vidíme, že skupiny E a F se statisticky významně liší od skupiny B a D.



Obr. 13 Korelačně-regresní analýza

Na Obr. 13 vidíme graf závislosti mezi hloubkou průniku a mírou proimpregnování. Je patrné, že mezi těmito proměnnými existuje přímo úměrná, lineární závislost. Hodnota koeficientu determinace odpovídá hodnotě 0,6249.

## 5.5 Příjem koncentrované látky pro proimpregnovanou část

Tab. 15 obsahuje vypočítané hodnoty příjmu koncentrované účinné látky při ředění přípravku v poměru 1 : 25.

Tab. 15 Statistické zhodnocení příjmu koncentrované látky v proimpregnované části vzorku

skupina	A	B	C	D	E	F
aritmetický průměr [kg·m <sup>-3</sup> ]	48	24	28	22	13	6
medián [kg·m <sup>-3</sup> ]	42	24	23	24	10	7
minimum [kg·m <sup>-3</sup> ]	25	18	18	9	8	2
maximum [kg·m <sup>-3</sup> ]	126	28	48	29	22	11
směrodatná odchylka [kg·m <sup>-3</sup> ]	28	3	11	7	5	3
variační koeficient [%]	59	12	39	31	37	45

Popisná statistika pro příjem v Tab. 15 ukazuje, že nejvyšší průměrná spotřeba koncentráту 48 kg·m<sup>-3</sup> je ve skupině A, nejnižší průměrná spotřeba 6 kg·m<sup>-3</sup> nastala ve skupině F. Nejvyšší naměřená hodnota je 126 kg·m<sup>-3</sup> a nejnižší příjem je 2 kg·m<sup>-3</sup>. Variační koeficienty se pohybují mezi 12 a 59 %. Nutné je podotknout, že jsou výsledky ovlivněny možnostmi změření míry proimpregnování.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Příjem impregnační látky

Doporučený minimální příjem impregnační látky u přípravku Bochemit FORTE PROFI je  $14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  podle ČSN EN 599-1, při použití tlakovakuové impregnace v třídě použití 4 - exteriér, země, voda. ([www.bochemie.cz](http://www.bochemie.cz)). Námi naměřený příjem pracovního roztoku ochranného roztoku se pohyboval v rozmezí  $30 - 100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Příjem u skupiny F dosáhl hodnoty  $34 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jedná se o nejnižší příjem roztoku, který jsme zaznamenali. Tato skupina vzorků zastupuje čerstvě pokácené kmeny, kde se vlhkost běli pohybuje v rozmezí  $130 - 160 \%$  (Trebula, 2002) a vlhkost zralého dřeva je  $3 - 3,5$  krát nižší než u běli (Požgaj, 1997). Lumeny buněk, kde probíhá proudění a které by měly pojmout ochrannou látku, jsou naplněny vodou volnou. Jelikož je voda téměř nestlačitelná, působí impregnační prostředek (kapalina) tlakem proti vodě volné v tracheidách, které tvoří uzavřenou soustavu.

Při této vlhkosti dřeva není v tracheidách dřeva volný prostor pro ochranný prostředek a hybnou silou je vnější tlak a gradient koncentrace u bělové část, jelikož obsahuje výrazně více vody volné než vyžralá část kmene.

Příjem u skupiny E se mírně zvýšil na hodnotu  $61 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , to lze vysvětlit vysušením části vody volné, čímž se ve dřevě vyskytl prostor pro vtlačení impregnace pomocí vnějšího tlaku (přetlaku).

U skupiny D se opět výrazně snížil příjem impregnačního roztoku na poloviční hodnotu. Při sušení dřeva nad MH vznikají ve dřevě značné kapilární síly, které by již mohly způsobit vychýlení uzavírací blanky nebo marga ve dvojtečkách v jarním dřevě. Důvodem uzavření jarních dvojteček je potřebný poměrně nízký tlak  $5 \text{ MPa}$ , ale u letních tracheid  $50 \text{ MPa}$ , čehož při sušení není možné dosáhnout. Při vlhkosti dřeva  $40 \%$  musíme zohlednit, že bělová část, kterou impregnujeme je již značně vysušená (až o dvě třetiny) a probíhá zde uzavírání dvojteček.

Další výrazný nárůst příjmu jsme zjistili ve skupině C, kde se příjem nejčastěji pohyboval kolem hodnoty  $64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Zvýšení příjmu při dosažení meze hygroskopicity si vysvětlují tím, že se ve dřevě nevyskytuje voda volná. Při impregnaci tedy působí odpor pouze vzduch v kapilárách a je možné do dřeva naimpregnovat více přípravku. Uzavření větších ztenčenin v jarním dřevě může způsobit relativní zvýšení kapilární elevace v letním dřevě (Požgaj, 1997).

U skupiny vzorků B se příjem výrazně snížil k hodnotě  $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Snížené hodnoty příjmu můžeme vysvětlit již úplně uzavřenými ztenčeninami. Po aspiraci dvojteček je torus poután na buněčnou stěnu pomocí chemických vazeb a zhoršuje impregnaci. Jelikož se po vysušení dřeva v tracheidách nenachází kapalná voda (volná), nevyskytují se zde ani žádné kapilární jevy, které by podporovaly příjem ochranné látky do dřeva. Tato skupina vzorků se sušila v klimatizačním zařízení při  $20^\circ\text{C}$  a relativní vzdušné vlhkosti 55 %.

Nejvyšší příjem přes  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ochranné látky jsme dosáhli u skupiny A při vlhkosti dřeva 0 %. Tento vysoký příjem zapříčinily hluboké trhliny ve dřevě, které zde vznikly při odlišném sušení vzorků dřeva v sušárně při vysoké teplotě. Tyto výsušné trhliny vznikají při tvrdém režimu sušení dřeva a vytváří ve dřevě systém propojených mikrotrhlin a makrotrhlin. Při impregnaci se tedy ochranná látka rozvede tímto systémem prasklin do větší hloubky.

Použitím Kruskal-Wallisova testu (viz. Tab. 8) jsme zjistili statisticky významnou odlišnost vzorků A, C a E od zbylých skupin. Také u těchto 3 skupin vzorků jsme prokázali nevyšší příjem ochranného prostředku. Tyto výsledky jsou vztaženy na objem celého vzorku a vycházejí výrazně nižší hodnoty. Důvodem je, že při výpočtu se počítá s celým objemem vzorku. Zatímco při zhodnocení příjmu koncentrované látky vztažené pouze na proimpregnovanou část (viz. kapitola 6.4) se počítá přes poměr mezi proimpregnovanou a neproimpregnovanou částí. Při těchto výpočtech je příjem v proimpregnované oblasti při výpočtech vyšší a to i když přihlédneme na nepřesnost při měření míry proimpregnování. Ta je reálně větší, ale oblasti mikrotrhlin nejsme schopni změřit bez přístrojů na přesnější měření mikroskopických proimpregnovaných oblastí. Zvýšením proimpregnované zóny by se celkový příjem impregnace mohl výrazně snížit k  $1/3$  až  $1/4$  množství.

## 6.2 Hloubka průniku

Dřevo smrku je extrémně obtížně impregnovatelné s minimálním průnikem i po několika hodinách působení tlakové impregnace (Ptáček, 2009). Při použití ochranných látek rozpuštěných ve vodě a využití difúze lze smrk s vysokou vlhkostí proimpregnovat do hloubky 10 – 20 mm v radiálním směru (Paserin, 1971).

V našich zjištěných výsledcích jsme zjistili, že nejvyšší průnik impregnace jsme docílili při čerstvě pokáceném dřevu a při vlhkosti 60 %. V těchto skupinách vzorků jsme dosáhli nejčastěji hloubky 8,80 mm resp. 10,10 mm. Důvodem většího průniku

u těchto dvou skupin je vzájemná propojenost vodivých elementů ve dřevě. Jelikož u mokrého dřeva nejsou uzavřeny dvojtečky, působí při impregnaci ve dřevě difúze, při které je možné smrku proimpregnovat prakticky celou bělovou část kmene. Nevýhodou je, že při působení difúze je množství přijaté ochranné látky do dřeva výrazně nižší. V těchto případech jsme dodrželi minimální průnik podle normy ČSN EN 351-1. U ostatních skupin vzorků jsme zjistily, že souvislý průnik se pohyboval kolem 1 mm, v případě vzorků s vlhkostí 0 % jsme naměřili průnik 3,6 mm. U nižších vlhkostí dřeva jsme potvrdili, že dřevo smrku je obtížně impregnovatelné.

Z Kruskal-Wallisova testu (viz. Tab. 11) a přihlédnutí na krabicový graf Obr. 11 můžeme konstatovat, že skupiny E a F se statisticky významně odlišují od ostatních skupin B a D. V případě odstranění jednoho vzorků odlehlého měření můžeme označit skupinu C statisticky odlišnou od E a F. Skupina A se přibližuje ke skupinám E a F, ale pro praxi je téměř nevyužitelná z důvodů velké energetické a ekonomické náročnosti při sušení a zbytečnému podsušování dřeva pro externí podmínky, kde dřevo má běžně vlhkost  $19 \pm 2$  % i více (Trebula, 2002).

Jak můžeme vidět, hloubka průniku impregnace i při použití metody Bethell nedosáhla u sušených skupin vzorků A, B, C a D ani 5 mm. Takto ošetřené dřevo není vhodně chráněné pro požadovanou třídu použití 4 – exteriér, země voda. U skupin E a F jsme dosáhli průměrného průniku cca. 10 mm v radiálním směru. Takovýto průnik již splňuje minimální doporučenou hodnotu pro hloubkovou impregnaci smrkového dřeva a zabezpečuje trvanlivost sloupů (Reinprecht, 2008). U kulatinového sortimentu z obtížně impregnovatelného dřeva je v oblasti země – voda a voda – vzduch vyžadované provedení perforace, tzv. navrtáním dírek o hloubce min. 20 mm (ČSN 49 0600-1).

Průnik ochranné látky u smrku je možné zlepšit pomocí mechanických, fyzikálních, chemických a biologických úprav (Reinprecht, 2008) nebo použitím cyklických postupů impregnace. Při těchto postupech se střídají cykly vakua, přetlaku nebo střídání teploty přípravku (Paserin, 1983).

### **6.3 Míra proimpregnování vzorků**

Při stanovení míry proimpregnování vzorků jsme zjistili, že nejvyšší hodnoty proimpregnování na příčném řezu se vyskytovaly ve skupině E a F, kde jsme dosáhli 20,85 a 19,65% proimpregnování ochranným přípravkem. I když se tento výsledek může zdát jako ideální, je nutno podotknout, že při těchto vysokých vlhkostech působila

difúze a tak celkový příjem ochranné látky je minimální. Taktéž výsledky ovlivnilo celkově suché léto, které zapříčinilo výrazně nižší vlhkost i u rostoucích stromů.

Zajímavým výsledkem skončilo vyhodnocení výsledků skupiny C, tedy vzorků na MH. U této skupiny se pomocí vnějšího tlaku při impregnaci míra proimpregnování vzorků ustálila na 10,53 %. Při této vlhkosti dřeva smrku by se tedy dalo při mírném předupravení docílit ideálního proimpregnování u sloupového materiálu k impregnaci (Reinprecht, 2008). Měření míry proimpregnování se provádělo v programu ImageJ pomocí prahování u snímků v barevné hloubce 8-bit. I tímto měřením jsme však nebyli schopni změřit veškeré proimpregnované oblasti ve dřevě např.: mikrotrhliny, které zvětšují reálně ošetřenou míru proimpregnování a to převážně v bělové oblasti dřeva.

#### **6.4 Příjem koncentrované látky vztažený pouze na proimpregnovanou část**

Minimální příjem koncentráту podle DIN 68 800 uvádí výrobce v technickém listě ochranného prostředku  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ([www.bochemie.cz](http://www.bochemie.cz)). Tato hodnota nebyla dosažena u skupiny F. Skupina E již splňuje tuto podmínku, ale můžeme konstatovat, že množství ochranné látky je ve dřevě poměrně nízké. U všech skupin se příjem koncentrované látky taktéž vypočítával z míry proimpregnování a rozdílu hmotnosti před a po impregnaci. Jelikož se tento příjem vypočítal z plochy, která byla skutečně proimpregnovaná, můžeme tedy předpokládat, že by se příjem koncentrované látky mohl výrazně snížit u skupin A, B, C a D po započítání proimpregnovaných oblastí mikrotrhlin z bělové části dřeva (viz. Obr. 10).

Tyto mikrotrhliny vznikají při sušení po téměř celém průřezu bělového dřeva. V některých případech se navzájem propojí do systému, kterým při impregnaci prochází ochranná látka do větší hloubky. Jelikož jsou tyto trhliny prakticky neviditelné pouhým okem, je obtížné po testu na přítomnost mědi určit tyto oblasti.

Pro zvýšení množství ochranného přípravku je možné u dřeva udělat předúpravu pomocí perforace, působením biotických činitelů – jisté typy hub, nebo mikrovlnou předúpravou.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo zjistit vliv vlhkosti na příjem ochranné látky při použití přetlakově-podtlakové impregnace u rostlého dřeva smrku – *Picea abies*. Dále jsme zkoumali hloubku průniku a míru proimpregnování. Pro tento experiment byla zvolena impregnace Bochemit FORTE PROFI určená pro průmyslové impregnace dřeva tlakovými metodami.

Po provedení přetlakově-podtlakové impregnace jsme zjistili, že nejvyšší příjem ochranného přípravku  $103 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  se vyskytuje u dřeva s vlhkostí 0 % a nejnižší příjem nastal u čerstvě pokáceného dřeva. Po statistickém zpracování byl příjem mezi skupinami vzorků vyhodnocen jako statisticky významný.

Naopak při stanovení průniku ochranného prostředku bylo zjištěno, že největší průměrné hloubky se dosáhlo u čerstvého dřeva. Nejnižší průnik byl zjištěn v rozmezí vlhkosti 10 – 40 %. Míra proimpregnování vzorků se shoduje s průběhem hloubky průniku. I zde můžeme konstatovat, že skupiny E a F byly vyhodnoceny jako významně statisticky odlišné.

## 8 CONCLUSION

The main aim of the thesis was to elucidate the impact of the initial wood moisture on the intake of protecting agent while using overpressure-vacuum impregnation in spruce wood (*Picea abies*). We tested the depth and level of the penetration. For the experiments we used the impregnation Bochemit FORTE PROFI which is designed for industrial wood processing.

While using overpressure-vacuum impregnation we concluded that the highest intake of the protecting agent ( $103 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) was determined in the wood with 0% wood moisture, the lowest intake was determined in the freshly felled wood. The difference between the level of agent's intake was statistically significant.

On the contrary, the penetration of the protecting agent was deepest in the fresh wood. The lowest penetration was measured in wood with wood moisture between 10 and 40 %. The level of the impregnation agrees with the depth of the penetration. In terms of statistical significance, the level of the penetration was also significantly different in samples with the 60% and higher dampness.



## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### 9.1 Knihy a odborné publikace

HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2., přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

KOČÍ, A. Nové universum A-Ž: všeobecná encyklopedie. 1. vyd. V Praze: Knižní klub, 2003, 1303 s. Universum (Knižní klub). ISBN 80-242-1069-x.

KURJATKO, S., REINPRECHT, L. Transport látok v dreve. 1. vyd. Zvolen: VŠLD, 1993. 110 s. Vědecké a pedagogické aktuality. ISBN 80-228-0307-3.

PASERIN, V. Impregnácia dreva smreka a jedle. Bratislava: ŠDVÚ, 1970. 26 s. ISBN: nedohľadáno

PASERIN, V. Ochrana drevených konštrukcií, Bratislava: Alfa, 1983, 170 s. ISBN: nenalezeno.

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

PTÁČEK, P. Ochrana dřeva. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 95 s. ISBN 978-80-247-2326-6.

REINPRECHT, L. Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica. 1. vyd. Vo Zvolene: Technická univerzita, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. Stavba dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. 187 s. ISBN 80-7157-636-0.

TREBULA, P., KLEMENT, I. Sušenie a hydrotermická úprava dreva. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2002. 449 s. ISBN 80-228-1182-3.

### 9.2 Normy ČSN

ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach.

ČSN 49 0600-1 Ochrana dřeva – Základní ustanovení – Část 1: Chemická ochrana.

ČSN EN 351-1 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi – Rostlé dřevo ošetřené ochrannými prostředky – Část 1: Klasifikace průniku a příjmu ochranného prostředku.

ČSN EN 355-1 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi – Definice tříd – Ohrožení biologickým napadením – Část 1: Všeobecné zásady.

### 9.3 Internetové portály

Kučerová, I. Kapitoly v interních elektronických skriptech vypracovaných v rámci projektu FRVŠ č. 920/2011, Dřevo. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/homepage/rud/index/studium/bakalarske/mpo>: Dřevo (43 s.) [cit. 2016-01-03]

<http://www.bochemie.cz/cs/odvetvi-produkty-ochrana-dreva-bochemit-pro-prumyslove-zpracovani-dreva-bochemit-forte-profi> [cit. 2016-02-02]

<http://pilahuska.cz/www/sluzby/tlakova-impregnace-dreva.html> [cit. 2016-04-07]

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schématické znázornění dvojtečky: a) otevřené, b) uzavřené (Reinprecht, 2008)	14
Obr. 2 Vodivé cesty ve dřevě jehličnanů (Požgaj, 1997)	16
Obr. 3 Impregnační způsob metodou Bethell (Reinprecht, 2008)	18
Obr. 4 Impregnační způsob metodou Rüping (Reinprecht, 2008)	18
Obr. 5 Impregnační autokláv	21
Obr. 6 Zkušební vzorek před sušením	22
Obr. 7 Výsledný kontrast mezi proimpregnovanou (černá) a neproimpregnovanou plochou	24
Obr. 8 Srovnání šířky běli mezi vzorky (vlevo: vzorek s největší šířkou běli, vpravo: vzorek s nejmenší šířkou běli)	26
Obr. 9 Vliv vlhkosti na příjem impregnační látky	27
Obr. 10 Zkušební vzorky po impregnaci při různých vlhkostech: a) $w = 0 \%$ , b) $w = 10 \%$ , c) $w = MH$ , d) $w = 40 \%$ , e) $w = 60 \%$ , f) $w = 80 \%$ a více	29
Obr. 11 Vliv vlhkosti na průnik impregnační látky	30
Obr. 12 Vliv vlhkosti na míru proimpregnování	32
Obr. 13 Korelačně-regresní analýza	34

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Typové označení podle ČSN 49 0600-1 .....	11
Tab. 2	Klasifikace ipregnovatelnosti – ČSN EN 350-2 .....	13
Tab. 3	Doporučené koncentrace pracovních roztoků a minimální příjmy Bochemitu FORTE PROFI (www.bochemie.cz) .....	20
Tab. 4	Označení jednotlivých skupin vzorků .....	23
Tab. 5	Průměrná šířka běli u použitých kmenů .....	26
Tab. 6	Popisná statistika příjmu impregnační látky pro jednotlivé vlhkostní třídy .....	27
Tab. 7	Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro příjem impregnační látky .....	28
Tab. 8	Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro příjem ( $p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ statisticky nevýznamný rozdíl) .....	28
Tab. 9	Statistické zhodnocení průniku impregnační látky .....	30
Tab. 10	Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro průnik .....	31
Tab. 11	Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro průnik ( $p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ statisticky nevýznamný rozdíl) .....	31
Tab. 12	Statistické zhodnocení míry proimpregnování .....	32
Tab. 13	Výsledky Kruskal-Wallisova testu pro míru proimpregnování .....	33
Tab. 14	Vícenásobné porovnání Kruskal-Wallisova testu pro míru proimpregnování ( $p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ statisticky nevýznamný rozdíl) .....	33
Tab. 15	Statistické zhodnocení příjmu koncentrované látky v proimpregnované části vzorku .....	34

