

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Studijní program: P3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607V025 Teorie konstrukcí



Disertační práce

Téma:

**MINERALIZACE ROSTLÉHO KONSTRUKČNÍHO DŘEVA A JEJÍ
APLIKACE ZA ÚČELEM REDUKCE VLHKOSTNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚN**

**MINERALIZATION OF SOLID CONSTRUCTION WOOD AND ITS
APPLICATION IN ORDER TO REDUCE MOISTURE VOLUME CHANGES**

Školitel: doc. Ing. Jiří Ščučka, Ph. D.

Doktorand: Ing. Tereza Majstríková

Ostrava, prosinec, 2016

Abstrakt

Předložená práce je zaměřena na problematiku modifikace vlastností dřeva umělou mineralizací. Obsahuje návrh a experimentální ověření komplexu analytických metod pro identifikaci a charakterizaci mineralizačních komponent ve dřevě různých druhů dřevin, včetně využití standardních metod používaných při diagnostice dřevěných konstrukcí. Jako efektivní analytický nástroj pro popis přirozené i umělé mineralizace je doporučena elektronová mikroskopie SEM, umožňující kvalitně zhodnotit charakter depozice minerálních částic ve struktuře dřeva a také hloubku penetrace mineralizačního roztoku do materiálu. Pro kvantifikaci minerální složky v ošetřeném dřevě byla navržena a ověřena aplikace metod termické analýzy, včetně odvození základních vztahů pro kvantitativní popis mineralizace. Pro potvrzení vazby mineralizačního roztoku na buněčnou stěnu dřeva byl navržen a proveden experiment založený na hodnocení objemových změn mineralizovaných vzorků. Byly vybrány a otestovány vhodné mineralizační látky, jejichž aplikace na dřevo vede k významné redukci příjmu kapalné vody do pórového systému materiálu, a tím také k redukci vlhkostních objemových změn. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím přípravku obsahujícího methylsilanolát draselný jako účinnou složku, který vykazuje vysoký potenciál využití pro dřevěné materiály. Výsledky experimentů prokázaly, že rostoucí koncentrace mineralizačního roztoku významně omezuje příjem vody do ošetřeného dřeva. Byly získány nové poznatky o chování uměle mineralizovaného dřeva při jeho expozici v různých třídách použití. Získaná experimentální data ukázala, že u krátkodobě mineralizovaného dřeva je omezen příjem kapalné vody při zachování téměř konstantní hygroskopicity materiálu. Kromě vlastností, spojených s příjmem vody, byl prokázán také pozitivní vliv mineralizace na odolnost dřeva proti dřevokazným houbám a plísním. Významným zjištěním je negativní vliv mineralizace na pevnost dřeva. Dlouhodobá expozice dřeva v mineralizačním roztoku vede ke snížení pevnosti dřeva v tlaku a k mírnému zvýšení jeho hygroskopicity. Soubor získaných poznatků přispívá k pochopení procesů spojených s mineralizací dřeva a může být základem pro tvorbu technologických postupů mineralizace dřevěných konstrukčních prvků a jejich rozšíření ve stavební praxi.

Klíčová slova:

Mineralizace dřeva, hydrofobizace, organosilany, SEM, termická analýza, vlhkostní chování, odolnost proti biologickým činitelům, mechanické parametry

Abstract

The submitted work is focused on modification of wooden properties by artificial mineralization. It contains design and experimental verification of analytical method complex for identification and characterization of mineralization component in the wood of various tree species, including application of standard methods used in the diagnosis of wooden structures. Electron microscopy SEM is recommended as an effective analytical tool for description of natural and artificial mineralization, allowing quality assessment of the nature of mineral particles deposition in the wood structure and also penetration depth of mineralization solution into the material. Application of thermal analysis methods was designed and confirmed for the quantification of mineral components in the treated wood, including the derivation of fundamental relation for quantitative description of the mineralization. Experiment, based on the evaluation of volume changes of the mineralized samples, was designed and performed to confirm binding of mineralization solution into wooden cell wall. Suitable mineralization substances were selected and tested so that their wooden application leads to a significant reduction of liquid water intake into pore system of the material and thus to reduce the moisture volume changes. The best results were achieved by using the preparation containing methyl-tripotassiumsilanol as an active ingredient, which has high potential for use in wooden materials. Experiment results demonstrated that increasing concentration of mineralization solution significantly reduces the intake of water into the treated wood. The new information was gained about the behavior of artificially mineralized wood during the exposition into different use classes. The obtained experimental data showed that the liquid water intake is limited for short term mineralized wood while nearly constant material hygroscopicity is maintained. In addition to the properties associated with the water intake, positive mineralization effect on wooden resistance against decaying fungi and mould was also demonstrated. Negative impact of the mineralization on wooden strength is further information. Long term exposure of wood in mineralization solution leads to a reduction in wooden compressive strength and a slight increase of its hygroscopicity. Set of gained knowledge contributes to understanding the processes associated with wooden mineralization and can be the basis for the creation of technological processes for mineralization of wooden structural elements and their distribution in building practice.

Key words:

Wooden mineralization, water-repellent effect, organosilanes, SEM, thermal analysis, moisture behavior, biological resistance, mechanical parameters

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

Podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě disertační práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o disertační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – disertační práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Poděkování

Nejprve bych chtěla poděkovat svým školitelům za odborné vedení a konzultace v průběhu studia doktorského studijního programu, za přínosné rady a připomínky k disertační práci. Zejména chci poděkovat svému prvnímu školiteli doc. Ing. Vojtěchu Menclovi, CSc. a doc. Ing. Jiřímu Ščučkovi, Ph.D., který mi byl nápomocen v nelehké poslední fázi zpracování disertační práce.

Dále bych chtěla poděkovat za finanční podporu, která mi byla poskytnuta v rámci projektů:

- CZ.1.05/2.1.00/03.0082 – OP Výzkum a vývoj pro inovace – Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin – vědecký pracovník – Ph. D. student;
- CZ.1.07/2.3.00/20.0013 – Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO – člen výzkumného týmu katedry Stavebních hmot a hornického stavitelství;
- SP2013/72 – Využití mineralizace dřeva jako environmentálně přijatelné metody ochrany dřevěných konstrukcí – řešitel projektu;
- SP2014/134 Mineralizace rostlého dřeva organokřemičitany a její vliv na vybrané fyzikálně - mechanické vlastnosti ošetřeného materiálu – řešitel projektu.

Také chci poděkovat zaměstnancům TU ve Zvoleně za odborné rady a pomoc při provádění vybraných zkoušek a experimentů, jmenovitě prof. Ing. Ladislavu Reinprechtovi, CSc. a Ing. Miroslavě Mamoňové, PhD.

Velký dík patří také mým kolegům z Katedry stavebních hmot a diagnostiky staveb a Laboratoře stavebních hmot za podporu a pomoc při mém doktorském studiu i realizaci některých měření.

V neposlední řadě patří mé poděkování mojí rodině, konkrétně mé mamince, manželovi, prarodičům i dceři Žofii především za emoční podporu při studiu.

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk	9
1. Úvod	12
2. Cíl a obsah práce	13
3. Současný stav řešené problematiky	14
I. Teoretická část	17
4. Mineralizace dřeva	17
4.1 Mechanismy mineralizace dřevěných prvků a konstrukcí	18
4.1.1 Přirozená mineralizace dřeva	18
4.1.2 Technologie umělé mineralizace dřeva	19
4.2 Hydrofobizace dřeva	22
4.3 Transport chemických látek do struktury dřeva	23
4.4 Vliv mineralizace na výsledné vlastnosti dřeva	26
5. Metody výzkumu mineralizovaného dřeva	29
5.1 Metody pro identifikaci a popis mineralizace	31
5.1.1 Skenovací elektronová mikroskopie	31
5.1.2 Termická analýza	32
5.2 Diagnostické in situ metody dřevěných konstrukcí	35
5.2.1 Ultrazvuková průchodová metoda	35
5.2.2 Metoda odporového vrtání	37
5.3 Metody popisu vlhkostního chování mineralizovaného dřeva	38
5.4 Metody stanovení odolnosti proti biologickým činitelům	40
5.5 Metody stanovení mechanických parametrů	41
II. Experimentální část	43
6. Materiály v experimentu	44
6.1 Dřevo a výrobky ze dřeva	44
6.2 Chemické látky pro mineralizaci dřeva	47
6.3 Původní konstrukční profily	48
7. Použité experimentální a analytické metody	50
8. Popis mineralizace dřeva	51
8.1 Aplikace skenovací elektronové mikroskopie	51
8.1.1 Postup zkoušky	51
8.1.2 Dílčí výsledky	52
8.2 Aplikace termické analýzy	57
8.2.1 Postup zkoušky	57

8.2.2 Dílčí výsledky	60
8.3 Experimentální ověření vazby organosilanu na buněčnou stěnu	71
8.3.1 Postup experimentu	71
8.3.2 Dílčí výsledky	72
9. Diagnostika mineralizovaného dřeva in situ	74
9.1 Aplikace ultrazvukové průchodové metody	74
9.1.1 Postup zkoušky	74
9.1.2 Dílčí výsledky	75
9.2 Aplikace metody odporového vrtání	76
9.2.1 Postup zkoušky	76
9.2.2 Dílčí výsledky	78
10. Vlhkostní chování mineralizovaného dřeva	83
10.1 Hodnocení účinnosti hydrofobizátorů testem ve Swellometru	83
10.1.1 Postup zkoušky	83
10.1.2 Dílčí výsledky	84
10.2 Stanovení účinnosti proti bobtnání přípravku na bázi organosilanu	85
10.2.1 Postup zkoušky	85
10.2.2 Dílčí výsledky	86
10.3 Další experimenty související s vlhkostním chováním dřeva	87
10.3.1 Postup experimentů	87
10.3.2 Dílčí výsledky	90
11. Odolnost mineralizovaného dřeva proti biologickým činitelům	94
11.1 Stanovení odolnosti mineralizovaného dřeva proti dřevokazným houbám	94
11.1.1 Postup zkoušky	94
11.1.2 Dílčí výsledky	95
11.2 Stanovení odolnosti mineralizovaného dřeva proti plísním	97
11.2.1 Postup zkoušky	97
11.2.2 Dílčí výsledky	97
12. Mechanické parametry mineralizovaného dřeva	100
12.1 Stanovení pevnosti v tlaku podél vláken mineralizovaného dřeva	100
12.1.1 Postup zkoušky	100
12.1.2 Dílčí výsledky	101
12.2 Stanovení rázové houževnatosti mineralizovaného dřeva	103
12.2.1 Postup zkoušky	103
12.2.2 Dílčí výsledky	105
13. Zhodnocení výsledků a diskuze	107

13.1 Popis mineralizace dřeva	107
13.2 Diagnostika mineralizovaného dřeva in situ.....	108
13.3 Vlhkostní chování mineralizovaného dřeva	109
13.4 Odolnost mineralizovaného dřeva proti biologickým činitelům	110
13.5 Mechanické parametry mineralizovaného dřeva	110
14. Závěr a význam pro praxi	112
Použité zdroje.....	114
Normativní zdroje.....	114
Odborné knihy.....	114
Odborné články.....	115
Internetové zdroje	117
Další zdroje	118
Seznam obrázků	119
Seznam tabulek.....	122
Přílohy.....	124
Příloha 1 – Termická analýza (numerické vyhodnocení).....	125
Příloha 2 – Termická analýza (křivky mineralizovaného dřeva)	135
Seznam vlastních publikací.....	179
Účast na projektech.....	183

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_{12}	rázová houževnatost při 12 % vlhkosti [$J \cdot cm^{-2}$]
A_{DB}	vzorky ze subfossilního dubového dřeva
A_w	rázová houževnatost při konkrétní vlhkosti v době zkoušky [$J \cdot cm^{-2}$]
AI	aktivní složka (active ingredient) [%]
AP	axiální parenchym
$AS_{relative}$	relativní účinnost přípravku proti bobtnání [%]
ASTM	technická norma vydaná American Society of the International Association for Testing and Materials
BEI	zobrazení odražených elektronů (Back Scattered Electron Imaging)
BSE	zpětně odražené elektrony (backscattered electrons)
C	koncentrace roztoku [%]
CL	katodoluminiscenční záření
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Česká harmonizovaná technická norma
DSC	diferenční skenovací kalorimetrie
DTA	diferenční termická analýza
EDX	energeticky disperzní rentgenová spektroskopie (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy)
ENDO	endotermický efekt
EW	jarní dřevo (early wood)
EXO	exotermický efekt
F_{max}	maximální síla při porušení vzorku [kN]
FAST	Fakulta stavební
IČ	infračervený
L	měřicí základna (vzdálenost středů dotykových ploch dvou sond) [m]
$L \times R \times T$	podélný, příčný a tangenciální řez
LLD	lepené lamelové dřevo
LW	letní dřevo (late wood)
MA	stupnice plísňové aktivity

Q	práce nutná k přeražení tělesa při zkoušce Charpyho kladivem [J]
R. V.	relativní vlhkost vzduchu
$R_{Al-Surface}$	plošný příjem mineralizačního roztoku [$g \cdot m^{-2}$]
$R_{Al-Volume}$	objemový příjem mineralizačního roztoku [$kg \cdot m^{-3}$]
RTG	rentgenový
S_1, S_2, S_3	části sekundární buněčné stěny dřeva
S_{DB}	vzorky ze dřeva současného dubu letního
S_{treat}	změna rozměru ošetřeného vzorku dřeva v tangenciálním směru vzniklá bobtnáním [mm]
$S_{untreat}$	změna rozměru neošetřeného vzorku dřeva v tangenciálním směru vzniklá bobtnáním [mm]
SE	sekundární elektrony
SEI	zobrazení sekundárních elektronů (Secondary Electron Imaging)
SEM	skenovací elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscopy)
TG	termogravimetrická analýza
UV	ultrafialový
V	objem vzorku [mm^3]
V_0	počáteční objem vzorku [m^3]
V_x	objem vzorku po expozici v mineralizačním roztoku trvajícím x dnů [m^3]
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
a, b	rozměry zkušebních vzorků [mm]
a_x, b_x, c_x	rozměry stran kvádrových vzorků v čase x [mm]
C_{min}	koncentrace nespalitelné minerální složky na $1 m^3$ dřeva [$kg \cdot m^{-3}$]
$C_{min,total}$	koncentrace celkové minerální složky na $1 m^3$ mineralizovaného dřeva [$kg \cdot m^{-3}$]
C_{nesp}	koncentrace nespalitelné složky na $1 m^3$ dřeva [$kg \cdot m^{-3}$]
d	průměr vzorku [mm]
f_{DT}	výsledek destruktivní zkoušky
f_{NDT}	výsledek nedestruktivní zkoušky
l	výška vzorku [mm]
m_0	hmotnost vzorku před ošetřením [g], hmotnost vzorku před provedením termické analýzy [mg]

m_1	hmotnost vzorku po ošetření [g]
$m_{\text{after-treat}}$	hmotnost vzorku po provedení mineralizačního ošetření [g]
$m_{\text{before-treat}}$	hmotnost vzorku před provedením mineralizačního ošetření [g]
$m_{\text{clim-after-treat}}$	hmotnost ošetřených vzorků po expozici v daném prostředí [g]
$m_{\text{clim-decayed}}$	hmotnost ošetřených vzorků po degradaci dřevokaznou houbou a následné expozici v daném prostředí [g]
m_{min}	hmotnost minerálního podílu v popelu [mg]
m_{nesp}	hmotnost nespalitelného podílu [mg]
p.a.	pro analytické účely
t	čas od vyslání pulzu budičem po jeho záznam snímačem přístroje u ultrazvukové průchodové metody [s]
v_{uz}	čas průchodu ultrazvukového vlnění materiálem [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
w	vlhkost vzorku [%]
\bar{x}	průměrná hodnota veličiny x
Δ_{min}	podíl minerálních částic obsažených v popelu [%]
Δ_{nesp}	nespalitelný podíl [%]
$\Delta_{\text{nesp,ref}}$	nespalitelný podíl referenčních (neošetřených) vzorků z dané dřeviny [%]
Δ_{sp}	spalitelný podíl [%]
$\Delta_{\text{sp,min}}$	spalitelný podíl odparků mineralizačních látek [%]
Δm	procentuální změna hmotnosti dřeva po vystavení působení roztoku nebo degradaci dřevokaznou houbou [%]
ΔV_x	změna objemu vzorku dřeva po expozici v mineralizačním roztoku trvajícím x dnů [%]
α	korelační součinitel upřesněné zkoušky, opravný koeficient pro přepočty pevnosti a rázové houževnatosti
ρ	hustota dřeva (odpovídá objemové hmotnosti) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ_{12}	pevnost v tlaku ve směru vláken při 12 % vlhkosti [MPa]
σ_w	pevnost v tlaku ve směru vláken při konkrétní vlhkosti v době zkoušky [MPa]
σ_x	směrodatná odchylka veličiny x

1. ÚVOD

Aplikace dřevěných konstrukcí ve stavebnictví je tradiční technologií. S výhodou se tohoto materiálu využívalo a stále využívá zejména pro stropní a střešní konstrukce, táhla, věnce, překlady, obklady, podlahy, výplně otvorů, konstrukce schodišť a také pro svíslé nosné konstrukce (roubené a hrázděné stavby), konstrukce pilotových základů a přístavních hrází [21]. Toto široké spektrum uplatnění dřeva ve stavebních konstrukcích bylo zapříčiněno zejména jeho nízkou objemovou hmotností, dobrou opracovatelností, pevností, tepelně izolačními parametry a i dalšími vlastnostmi. Důležitým faktem je také to, že je dřevo obnovitelnou surovinou.

V současné době jsou při výstavbě upřednostňovány jiné, moderní materiály, které ve srovnání se dřevem vykazují vyšší odolnost zejména proti povětrnostním vlivům. Kromě relativně nízké odolnosti dřeva proti vnějším vlivům, patří k nevýhodám tohoto materiálu také jeho ortotropní charakter, nízká odolnost proti působení biologických škůdců a poměrně vysoká hygroskopicitu. Zvýšený příjem vody v kapalném i plynném skupenství negativně ovlivňuje ostatní fyzikálně – mechanické vlastnosti i trvanlivost dřeva. Trvanlivost jednotlivých druhů dřeva je odlišná, přičemž značný vliv na její zkrácení má kolísání vlhkosti (např. u konstrukčních prvků, které jsou ve styku se zemí). Vlhkost je hlavním činitelem, ovlivňujícím částečnou nebo i celkovou degradaci materiálu [31, 33]:

- Fyzikální degradace dřeva je zapříčiněna zejména změnou obsahu vody, s tím souvisejícími objemovými změnami (bobtnání nebo sesychání) a vznikem napětí, přičemž důležitá je také rychlost této změny.
- Výskyt biologické degradace je podmíněn vhodným prostředím, konkrétně u dřevokazných hub vlhkostí dřeva nad 20 % a teplotou prostředí od 3 – 8 °C do 35 – 40 °C a u dřevokazného hmyzu vlhkostí dřeva nad 10 % a teplotou prostředí nad 10 °C [21].
- Při atmosférické degradaci dochází ke kombinaci vlivu UV záření, vzdušného kyslíku, deště, teploty, které způsobují tzv. povětrnostní stárnutí, které významně limituje využití dřeva v podmínkách exteriéru.
- Chemická destrukce je nejčastěji způsobena kyselou hydrolyzou, danou vyšším množstvím kyselých polutantů v ovzduší a zvýšenou relativní vlhkostí.

Aplikací vhodného ošetření, které povede k omezení příjmu vody a bude zároveň sloužit k udržení vyrovnané vlhkosti s nízkými hodnotami, můžeme významně prodloužit trvanlivost dřeva v konstrukci. Jednou z možností je využití principu mineralizace dřeva, tedy přirozeného jevu, který vzniká za specifických podmínek, a jehož charakteristickým výsledkem je právě prodloužení životnosti materiálu. Proces mineralizace (pertrifikace) je obecně založen na nahrazení organických látek ve dřevě látkami minerálními, obsaženými v půdě nebo v podzemních a odpadních vodách (především oxidem křemičitým). Lze předpokládat, že dřevo cíleně upravené totální i částečnou mineralizací bude vykazovat zvýšenou trvanlivost a bude jej možné využít i pro exponované stavební konstrukce. Vytvoření cíleného ošetření, které je založeno na příjmu minerální složky do struktur dřeva a jejím navázáním na organický materiál, může sloužit jako důležitý prvek pro rozšíření aplikace dřevěných konstrukcí v současném stavitelství.

2. CÍL A OBSAH PRÁCE

Cílem disertační práce je posoudit vliv mineralizace dřeva na jeho vlastnosti spojené především s příjmem vody a vlhkosti, např. na redukci vlhkostních objemových změn, mechanické parametry materiálu, biologickou odolnost dřeva nebo na vlhkost v jednotlivých třídách použití. K dosažení vytčeného cíle byl proveden výzkum s pomocí komplexu vhodných experimentálních a analytických metod.

Teoretická část práce je rozdělena do dvou kapitol, přičemž první je věnována mineralizaci a druhá metodám jejího zkoumání. K tématu mineralizace zde lze nalézt informace o přirozené i umělé mineralizaci, s tím související hydrofobizaci, dále o transportu chemických látek do struktury dřeva a také o vlivu mineralizace na výsledné vlastnosti dřeva. V rámci části věnované metodám zkoumání mineralizace jsou zde popsány metody pro identifikaci a popis mineralizace, diagnostické in situ metody, metody popisu vlhkostního chování mineralizovaného dřeva, metody stanovení odolnosti proti biologickým činitelům a metody stanovení mechanických parametrů.

V experimentální části je hodnocen výskyt (rozložení) minerální složky v dřevní hmotě, odebrané především z uměle mineralizovaných profilů dřeva, pomocí vhodných analytických metod, konkrétně skenovací elektronové mikroskopie a termické analýzy. Na základě těchto zkoušek je možné určit i množství vyskytující se minerální látky, nebo popsat pronikání minerální složky z roztoku do zkušebních dřevěných vzorků, což napomůže k celkovému pochopení mechanismu mineralizace tohoto organického materiálu. U stávajících přirozeně mineralizovaných konstrukcí, je možné tyto poznatky využít při stavebně technických průzkumech pro odhad vybraných parametrů, ale i životnosti jednotlivých konstrukčních prvků. V rámci této části proběhlo i ověření aplikace standardních diagnostických metod, používaných pro konstrukční dřevěné prvky.

Pro ověření předpokladu, že mineralizované dřevo z hlediska příjmu vody a vlhkosti vykazuje oproti původnímu materiálu lepší parametry, jsou provedeny příslušné experimenty a aplikovány zkušební postupy, ověřující chování dřeva v konkrétních třídách použití, vlhkostní objemové změny, smáčecí úhly atd. Kromě těchto parametrů je stanovena odolnost dřeva proti plísním a dřevokazným houbám a taktéž vliv mineralizace na pevnostní charakteristiky dřeva.

Průzkum výskytu a rozsahu mineralizace materiálu, možností jejího umělého provedení a pozitivních efektů na materiál přináší důležité informace, které slouží k detekci minerální složky v dřevní hmotě, k návrhu sekundární ochrany, případně sanačních zásahů. Jedním z cílů práce je také zvýšit důvěru uživatelů v dřevo jako stavební materiál, a tím přispět k rozšíření jeho použití v současném stavebnictví.

3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problematiku mineralizace (petrifikace) dřeva lze rozdělit do několika dílčích oblastí, které v současnosti představují hlavní oblasti vědeckého zájmu:

- výzkum přirozené mineralizace dřeva;
- modifikace dřevní hmoty, zahrnující experimenty k vytvoření uměle mineralizovaného dřeva;
- diagnostické metody pro popis struktury dřeva v různých strukturálních hladinách, jeho degradace, charakteru ošetření dřeva a jiných modifikací.

Přirozená mineralizace dřeva je známým jevem, vznikajícím za specifických podmínek po různě dlouhou dobu. Procesy spojené s přirozenou mineralizací dřeva jsou popsány v řadě učebních textů oboru geochemie a v další odborné literatuře [např. 14, 20, 34, 53, 62]. Poměrně podrobně je tato problematika popsána z hlediska strukturálních změn plně mineralizované dřeva vzniklého v odlišných podmínkách a při depozici široké škály minerálních částic, nejčastěji však oxidu křemičitého [60, 66]. Vzhledem k raritnímu výskytu těchto materiálů jsou pouze výjimečně u přirozeně mineralizovaného dřeva zkoumány jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti [53, 57]. Ojedinele byly u subfossilního dřeva, např. u dřevěných pilot, důlní výdřevy (obr. 1), nebo u celých kmenů v kontaktu s minerálními látkami, prováděny i testy mechanických vlastností [19].



Obr. 1 Důlní výdřevy – Poštovní štola, Zlaté hory

Přítomnost minerální látky v organickém materiálu indikuje ve většině případů jeho zvýšenou trvanlivost, ale také zvýšenou hydrofobicitu, pevnost, sníženou hořlavost a další změny [17, 25]. Experimenty s přímým napodobením mineralizované struktury dřeva jsou prováděny již od roku 1968, ne však v souvislosti s možným využitím takto modifikovaného dřeva ve stavebních aplikacích [34].

Aplikace minerálních roztoků na dřevo je již v dnešní době považována za perspektivní technologii, kterou lze provádět ve formě chemické ochrany (ošetření) nebo modifikace, a jenž má vliv na zvyšování trvanlivosti dřevěných konstrukcí [17, 25, 33]. Chemickou ochranou je možné zvýšit odolnost dřeva vůči působení biologických a abiotických činitelů a to aplikací vhodné chemické látky, která však nemění strukturu materiálu [17, 25, 33, 46]. Mezi tyto formy aplikace minerálních látek se řadí i povrchová

hydrofobizace dřeva [25, 78, 82]. Naproti tomu u modifikovaného dřeva dochází i k cílené změně struktury, která má za následek zlepšení některých vlastností, např. pevnosti, rozměrové stability, odolnosti proti biologickým činitelům, hydrofobicity atd. [25, 33, 47]. Zvýšení hydrofobicity povrchu dřeva již bylo sledováno u chemických látek na bázi fluorokřemičitanů, boritanů, acetanhydridů apod. [25, 35, 46, 47].

Průběh difúze roztoku do materiálu se řídí určitými zákonitostmi, jejichž znalosti slouží k vytváření modelů difúze, a to na základě vstupních parametrů, hmotnostního příjmu roztoku a odvozených vztahů [20, 25]. Mezi moderní technologie popisu difúze náleží aplikace neutronové radiografie [61].

U uměle mineralizovaného dřeva se zpravidla prověřují ty vlastnosti, které mohou být ošetřením, nebo modifikací dotčeny např. odolnost proti biologickým škůdcům, nebo povětrnostnímu stárnutí, pevnost, tvrdost, objemové změny [17, 25]. Požadavky jsou mimo jiné kladeny i na samotné chemické přípravky, přičemž se zkoumají aplikační vlastnosti a účinky na ošetřovaný materiál, spojovací prvky atd. [17, 23, 25]. U přípravků redukujících cíleně příjem kapalné vody je především sledován transfer vlhkosti v konkrétních podmínkách pod i nad bodem nasycení vláken u konstrukčních prvků [41, 42, 43]. Příkladem je výzkum jednostranného působení vlhkosti na obkladové materiály, nebo stropní trámy uložené na zdivo [64], nebo porovnání vlhkostních profilů dřeva opatřeného různými typy nátěrů, které taktéž mohou ovlivňovat příjem vlhkosti [63]. U organosilanů je hydrofobizační efekt zpravidla hodnocen metodami zkoumajícími příjem vody, smáčecí úhel a povrchové napětí nebo bobtnání a smrštění [79].

U dřevěných konstrukcí dochází k charakteristickým změnám vlastností a trvanlivosti nejen působením chemických látek při cíleném ošetření nebo modifikaci, ale i při přirozené mineralizaci nebo působením degradačních vlivů různého charakteru [25, 31, 33]. Při diagnostice přirozeně i uměle mineralizovaného dřeva je nutné primárně zjistit informace o původním rostlém materiálu [44]. Dále jsou hodnoceny strukturní změny, nejčastěji s použitím skenovací elektronové mikroskopie (SEM), kterou lze doplnit o stanovení prvkového složení pomocí rentgenové mikroanalýzy, zejména energeticky disperzní rentgenové spektroskopie (EDX) [51, 52, 66]. Na základě těchto metod je u přirozeně i uměle mineralizovaného dřeva definován proces růstu krystalů (např. křemene) doprovázený změnami buněčné struktury [53], případně je určován i geologický původ vzorků [57]. U uměle mineralizovaného dřeva slouží uvedené metody zejména k určení sledovaných charakteristik v povrchových vrstvách [59]. Kromě SEM jsou aplikovány i další analytické metody, například termická analýza, která je v současnosti používána zejména při popisu termické degradace původní matrice i jednotlivých složek dřeva [25, 36, 49], eventuálně také pro hodnocení změny hořlavosti ošetřených materiálů [80].

Při hodnocení stávajících dřevěných konstrukcí s potenciálním výskytem mineralizace jsou stejně jako i u jiných dřevěných konstrukcí nejprve popisovány všechny vizuálně patrné vady a poruchy [21, 26]. Skryté vady, nehomogenity, nebo části s odlišnými fyzikálně – mechanickými vlastnostmi lze odhalit až s využitím speciálního přístrojového vybavení. Tyto přístroje pracují na principu průchodu vlnění materiálem [26, 54, 55] (např. ultrazvukového, rentgenového) nebo monitorování změn mechanických vlastností podél profilu s využitím přístroje Resistograph nebo Fractometr [45, 54]. Použitelnost jednotlivých metod je pro každý účel a materiál ověřována. Vzhledem k poměrně velkému množství dat jsou zjištěné parametry poměrně dobře kvantifikovatelné [26, 45, 54, 55]. Naproti tomu „klasické“

laboratorní testy mechanických vlastností se, vzhledem k charakteru vzorků, provádí jen zřídka a poskytují také pouze omezený počet výsledků. Získané výsledky však, na druhou stranu, relativně dobře korespondují s reálnými vlastnostmi materiálu [19, 26]. Z tohoto důvodu se často provádí pro účely diagnostiky tzv. upřesněné nedestruktivní zkoušky [26].

Popsaný stav řešené problematiky poskytuje jen stručné informace o této rozsáhlé problematice. Dílčí oblasti budou popsány podrobněji v následujících kapitolách.

I. TEORETICKÁ ČÁST

4. MINERALIZACE DŘEVA

Životnost dřevěných konstrukcí může být prodloužena modifikací materiálu, založenou na principu mineralizace dřeva. Mineralizované (petrifikované) dřevo vzniká rozkladem buněčné stěny a následným kontinuálním ukládáním SiO_2 nebo jiných minerálních látek rychlostí a způsobem, který je slučitelný se zachováním rozměrové stability dřeva [53]. Pro duplikaci jednotlivých strukturních elementů při přechodu dřeva na „kámen“ je nejvhodnější SiO_2 v různých formách (od amorfního opálu až po krystalický křemen) [53]. Kompletní mineralizace dřeva trvá řádově miliony let, ale za specifických podmínek může dřevo mineralizovat výrazně rychleji [34, 53, 62].

Umělé prosycení struktury dřeva silikáty vede k obdobným strukturním změnám jako u mineralizace přirozené. Minerální roztok penetruje do matrice dřeva a zůstává v lumenech, nebo proniká do buněčných stěn mezi vrstvy sekundární buněčné stěny (S_1 , S_2 , S_3), primární buněčnou stěnu a střední lamelu, kde může chemicky reagovat s některými složkami. Transport chemických látek ve dřevě je ovlivněn strukturou dřeva (typem a počtem vodivých buněk, jejich propojením, průřezem lumenů, thylatací, stupněm uzavření teček atd.), hodnotou vlhkosti dřeva (nevysušené dřevo vykazuje vyšší permeabilitu), aplikačními vlastnostmi prostředku, tlakovými a difúzními transportními silami [22, 23, 25].

Výsledky prvního pokusu s umělou mineralizací dřeva v laboratorních podmínkách publikoval Drum v roce 1968 [34]. Použil sodné vodní sklo, pro něž bylo typické ukládání křemičitanu ve formě amorfního opálu na vnějším povrchu buněčné stěny. V roce 1976, Leo a Barghoorn simulovali umělou mineralizaci pomocí tetraethoxysilanu a stanovili, že křemičité částice vyplňují lumény buněk [34]. Přestože byly tyto experimenty prováděny v laboratorních podmínkách, odlišných od těch přirozených, vytvořené struktury byly velice podobné strukturám přirozeně mineralizovaným.

Pro analýzu uměle i přirozeně mineralizovaných vzorků lze použít celé spektrum analytické metody. Makroskopický vzhled dřeva je během ukládání minerálních částic zachován, na mikroskopické úrovni jsou však patrné změny vzniklé vlivem ulpívání novotvarů v organické matici. Z tohoto důvodu je důležité stanovit u přirozeně i uměle mineralizovaného dřeva stav organické matrice, typ a množství minerálních částic a také jejich umístění (v lumenech nebo buněčné stěně). Dále bývají stanovovány i některé fyzikální vlastnosti jako je objemová hmotnost, poróznost atd. [53, 57]. Hodnocení mechanických vlastností je u přirozeně mineralizovaného dřeva spíše raritní [19], mohou být však zjišťovány v případě uměle mineralizovaných profilů.

Organosilany se využívají k impregnaci materiálů v různých průmyslových odvětvích, například k ochraně betonu, cihel a kamene, a také při výrobě textilu, papíru nebo plastů [79]. Tyto látky jsou používány také v památkové péči [16]. Modifikace dřeva organosilany je využívána především pro vytvoření hydrofobizačního efektu, redukci povětrnostního stárnutí [38, 39, 76] a zamezení biologického poškození jednotlivých strukturních částí dřeva [40, 77]. Z mnoha skupin organokřemičitanů jsou pro modifikaci dřeva nejefektivnější molekuly monomerů silanu (např. alkyl – trialkoxy silany) a molekuly silikonových polymerů. Malé molekuly silanů dobře penetrují do struktury dřeva [25, 39]. Tyto molekuly reagují nejprve s vodou za vzniku silanolů a poté teprve reagují s $-\text{OH}$ skupinami dřeva [17, 25]. Silikony jsou polymery, používané ve formě vodných emulzí, které nejsou schopny

penetrovat mezi vrstvy buněčné stěny dřeva, po impregnaci vyplňují lumény dřevních buněk [17, 25].

4.1 MECHANISMY MINERALIZACE DŘEVĚNÝCH PRVKŮ A KONSTRUKCÍ

Základními strukturními složkami buněčných stěn dřeva jsou karbohydráty tvořené především polysacharidy, celulózu (40 – 60 %) a hemicelulózou. V buněčné stěně se hemicelulózová matrice formuje kolem vláken celulózy. Další složkou buněčné stěny dřeva je polyfenolická složka – lignin (20 – 30 %), který se úzce váže na hemicelulózu a vytváří síť kolem celulózy [22, 23, 25].

V závislosti na umístění prvku a charakteru působícího prostředí dřevní hmota podléhá různým korozním dějům, které postupně mění její chemické složení, strukturu i původní vlastnosti. Nahrazením organických částí dřeva minerály (převážně SiO_2 – silicifikace), vzniká modifikovaný materiál s lepšími trvanlivostními parametry při zachování původní struktury i na mikroskopické úrovni. Úplnou mineralizací zbytků kdysi vzrostlých stromů vzniká petrifikované dřevo [60, 62, 65]. Zkameněliny jehličnatých stromů (vyhynulých) se označují jako araukarity [68].

V geologii je zkoumán způsob mineralizace dřeva a jiných biologických materiálů v mírných teplotách studených geologických procesů [14, 56, 57]. Z hlediska biologického jsou hodnoceny možnosti a podmínky stabilizace měkkých nebo nestabilních tkání [56]. V materiálovém výzkumu je hlavním cílem příprava křemičité matrice, založená na principu přirozené mineralizace hmoty [58], dále také tvorba umělých kompozitů, ve kterých by byly na nosném uhlíkovém materiálu stabilně ukotveny částice SiO_2 [50] nebo oxidů kovů [56].

4.1.1 PŘIROZENÁ MINERALIZACE DŘEVA

K přirozené mineralizaci dochází většinou v zeminovém masivu, kde je zasypané dřevo infiltrováno vodou bohatou na minerály a tyto minerály se v něm ukládají. SiO_2 v různých formách je považován za nejvhodnější materiál k duplikování jednotlivých konstrukčních detailů dřeva (obr. 2). Představuje hlavní, nikoliv však jedinou možnou matici [53]. Kromě SiO_2 jsou v mineralizované matici dřeva pozorovatelné i jiné chemické látky zejména ve formě inkluzí.



a)

b)

Obr. 2 Vzorky mineralizovaného dřeva ze Sbírký Geologického pavilonu Prof. F. Pošepného, VŠB - Technická univerzita Ostrava: a – silicifikovaný opalizovaný kmen (ČR), b – intuskrustovaný fosilní kmen (ČR – Velká Černoc – pískovna)

V roce 1996 Weibel publikoval výzkum mineralizovaného dřeva z fluvialních sedimentů, kde byly zastoupeny křemičitany ve formě opálu, ale také křemene, který byl patrně uvolněn při procesu zvětvávání a vytváření hornin [65]. Jednotlivé vzorky v kontaktu s minerální vodou nebo vlhkou zeminou mineralizují a vzniká silicifikované dřevo se širokou škálou barev [66]. Charakteristické vlastnosti mineralizovaného dřeva často slouží jako zdroj informací pro výzkum starověké flóry, klimatu a prostředí, v kterém stromy rostly [60].

K mineralizaci dřeva přirozeným způsobem může docházet také v podmínkách stavby, konkrétně při kombinaci dřeva s hliněnými a jílovými materiály. Jako příklad můžeme uvést hrázděné stavby a stavby lidového stavitelství, kde jsou použité hliněné omítky i dusané výplňové vrstvy. Jak již bylo uvedeno, k mineralizaci dochází také vlivem působení silně mineralizované vody. Při působení odpadních vod, obsahujících minerální látky, nebo silně mineralizované vody v důlních podmínkách, proniká do struktury dřevní hmoty také příslušná minerální složka a dřevo mineralizuje [19, 34].

Urychlená přirozená mineralizace dřeva byla zkoumána především v prostředí minerálních vod, přičemž jako typický příklad urychlené mineralizace může být uvedeno působení vřidelní vody (zásadité i kyselé) [34]. Základním předpokladem urychlené mineralizace je prosycení struktury dřeva zásaditými roztoky křemičitanů, přičemž urychlení tohoto procesu lze zajistit pomocí předchozí expozice v kyselém prostředí [34]. Zvýšená teplota má na zrychlení procesu rovněž významný vliv. V roce 1935 Allen a Day hodnotili rychlost ukládání SiO_2 ($0,1 - 4,0 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$) v zásadité minerální vodě Yellowstonekého národního parku. Následně v letech 1978 a 1979 Sigleo při studiu národního parku Petrified Forest došel k závěru, že silicifikace je procesem postupného ukládání bez organického působení. V roce 1984 Scurfield a Segnit popsali křemičité minerály v mineralizovaném dřevě a konstatovali, že při mineralizaci pronikají křemičité látky hlouběji dřevem přes systém trhlín, nebo mikropórů buněčných stěn. V letech 1995 a 1998 se Landmesser pokusil z fyzikálně – chemického hlediska popsat proces transportu a následného ukládání křemičitých částic [34].

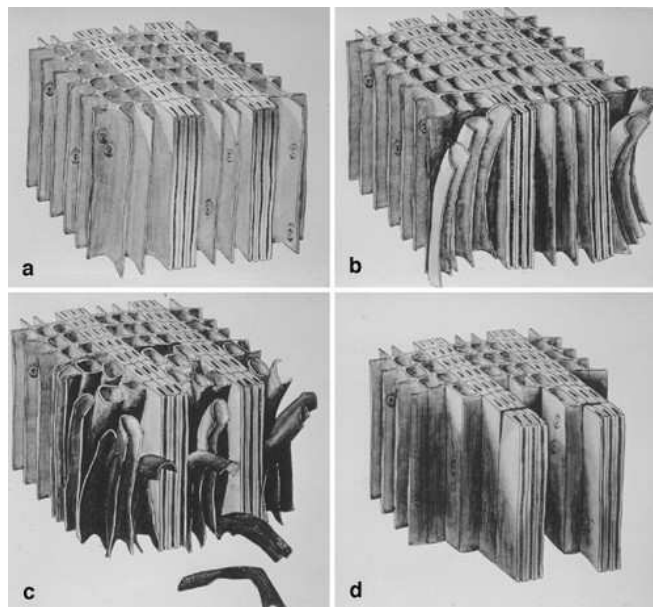
Znalost procesů zkamenění dřeva, kde jsou organické tkáně dřeva nahrazeny zejména křemičitým materiálem s více nebo méně jasným způsobem přeměny původní struktury, je omezená. Existuje pro to řada důvodů. Za prvé, ačkoli nálezy zkamenělého dřeva nejsou vzácné, systematický sběr těchto vzorků nebyl dosud prováděn. Za druhé, aplikace a vyhodnocení jednotlivých instrumentálních metod, vhodných pro analýzu zkamenělých materiálů, mohou být pro některé druhy vzorků problematické. Pro účely analýzy již byla zkoumána možnost aplikace různých analytických metody např. rentgenová difrakce, elektronová mikroskopie, infračervená spektroskopie atd.[53, 56, 57, 60].

4.1.2 TECHNOLOGIE UMĚLÉ MINERALIZACE DŘEVA

Umělé prosycení dřevní hmoty křemičitany vede stejně jako v případě přirozené mineralizace ke změnám vlastností dřeva. Vzniká tedy buď možnost chemického ošetření, nebo přímo modifikace materiálu.

Mezi metody chemického ošetření jsou řazeny ochranné nátěry proti povětrnostním vlivům (UV záření, vodě, emisím atd.), určené především pro exteriérové prvky. Hlavním úkolem této skupiny ochranných prostředků je stabilizovat vyluhovatelné látky, lignin-sacharidovou matici a deformace materiálu (obr. 3) [25, 82].

V praxi jsou pro ochranu dřeva před povětrnostními vlivy používány makromolekulární látky ve formě filmotvorných a lazurovacích nátěrů (olejové, alkydové, akrylátové atd.) nebo nízkomolekulových penetračních látek [25, 33, 82]. Druhá zmíněná skupina ošetření je schopna pronikat do větších hloubek, hydrofobizovat dřevo a případně chránit povrch před fotooxidací. Hlavní úlohou těchto látek je vytvoření hydrofobizačního efektu, díky němuž je zvýšena vodoodpudivost materiálu, a tím také jeho přirozená trvanlivost. Zkoumané mineralizační roztoky mohou být řazeny do této kategorie ošetření.



Obr. 3 Povětrnostní stárnutí dřeva: a – dřevo nevystavené povětrnostním podmínkám; b – první fáze povětrnostního stárnutí, uvolňování vláken; c – raná fáze ztráty vláken; d – pozdější fáze povětrnostního stárnutí, ztráta jarního dřeva, způsobující nerovný povrch [82]

Obecně lze hydrofobizátory definovat jako látky zpomalující degradaci dřeva, příznivě ovlivňující objemovou stabilitu dřeva, bránící růstu plísní, omezující únik extrahovatelných látek ze dřeva a zlepšující kvalitu povrchu dřeva ve venkovní expozici [25, 33, 82]. V současnosti jsou tyto ošetřující roztoky nejčastěji složeny z vodoodpudivých vosků, rostlinných olejů, stabilizátorů povětrnostní povrchové degradace, pigmentů, menšího podílu živic a rozpouštědel, případně mohou být doplněny o ochranné prostředky proti biologickým škůdcům dřeva. Aplikace prostředku chemické ochrany může probíhat povrchovým způsobem – nátěry a nástřiky, máčením, nebo hloubkovou impregnací ve vakuu, nebo za zvýšeného tlaku. Blíže jsou hydrofobizátory popsány v kapitole 4.2.

Pokud jde o modifikaci dřeva, té může být dosaženo aplikací mechanických, chemických, termických i biologických metod (tab. 1).

Tab. 1: Základní způsoby modifikace rostlého dřeva [25]

Modifikační metoda	Změna struktury dřeva		
	Geometrická a morfologická	Anatomická	Molekulární
Mechanická	+	+	-
Chemická – Vyplnění lumenů buněk	-	+	-
Chemická – Blokace –OH skupin	-	(+)	+
Termická	-	(+)	+
Biologická	-	-	+

+ ... výrazná změna, (+) ... nevýrazná změna, - ... beze změny

U chemické modifikace pronikají chemické látky bez přímého biocidního, nebo jiného ochranného účinku do dřeva a zůstávají v lumenech buněk nebo pronikají do buněčných stěn, kde se mohou s některými složkami vázat. Právě k chemické modifikaci dřeva se taktéž používají sloučeniny na bázi SiO_2 a kyseliny křemičité H_2SiO_4 – tzv. silikonové systémy, které primárně slouží k hydrofobizaci silikátových materiálů (kámen, beton, omítky atd.) [25, 79]. Ve struktuře dřeva, lumenech i buněčné stěně vznikají anorganické – křemičité síť a SiO_2 gely (silikáty, chlorsilany, alkoxyilany atd.) nebo organické – křemičité síť (např. silany, organosilany) [25, 82]. Biocidní účinnost těchto látek není prokázána. Při aplikaci bývají silikonové systémy často doplněny o biocidní látky rozpustné ve vodě, které jsou právě křemičitou složkou ve dřevě fixovány. Z křemičitých látek bývají využívány především [25]:

- Silikáty (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3) – tzv. vodní skla – pronikají do lumenů buněk, méně do buněčných stěn, zvyšují voděodolnost a tvarovou stabilitu a snižují hořlavost. Biologická odolnost dřeva není ovlivněna.
- Chlorsilany (typ SiCl_4) ve dřevě hydrolyzují na kyselinu křemičitou, která za zvýšené teploty (cca 100°C) reaguje s –OH skupinami dřeva za vzniku vazby Si-O-C. Modifikované dřevo vykazuje zvýšenou odolnost proti hnilobě, vzniká ovšem kyselina chlorovodíková (HCl), která způsobuje korozi dřeva.
- Alkoxyilany (typ tetraalkoxyilanů R_4SiO_4 apod.) hydrolyzují a následně za přítomnosti katalyzátoru (např. kyseliny octové) vytvářejí SiO_2 gelovou síť bez vzniku HCl, nebo jiného agresivního meziprojektu. Takto modifikované dřevo vykazuje nižší hořlavost a vyšší odolnost proti termitům. Odolnost proti hnilobě se výrazně nemění.
- Silikony (organo – křemičité polymery $\text{RX}_2\text{Si-O-(SiR}_2\text{-O)}_n\text{-SiRX}_2$), tvořící velké molekuly, se aplikují ve formě vodných mikroemulzí a koncentrují se převážně jen do lumenů buněk dřeva. Výskyt organických substituentů (R = methyl, ethyl atd.) silikonů způsobuje vznik hydrofobního efektu.
- Organosilany jsou organokřemičité monomerní látky minimálně s jednou vazbou Si-R', kde R' je organický uhlovodík, inertní (např. methyl, n-propyl), nebo reaktivní s jinými molekulami organosilanů, aditivity i složkami dřeva (vinyl, 3 – izokyanátpropyl apod.). Tyto látky hydrolyticky reagují s vodou za vzniku silanolů, které vytvářejí vazby se složkami buněčných stěn dřeva. Tyto vazby jsou ve vlhkém prostředí nestabilní, jelikož dochází k jejich zpětné hydrolyze. Větší stabilitu vykazují látky, obsahující reaktivní uhlovodíkovou skupinu R'.

Ošetření těmito látkami je ve své podstatě založeno na principu mineralizace dřeva.

Vhodnost aplikace jednotlivých minerálních látek pro ošetření, nebo modifikaci dřeva a charakter vzniklého mineralizačního efektu je nutné posuzovat vždy individuálně. Obecně lze říci, že ošetření a ani modifikace křemičitými roztoky není ve stavební praxi u konstrukčního dřeva příliš rozšířená.

Z hlediska normových požadavků jsou u těchto prostředků kontrolovány především korozivní účinky na kovy, schopnost penetrace v jednotlivých anatomických směrech, použitelnost pro jednotlivé aplikační technologie, vliv na mechanické vlastnosti dřeva (pevnost a pružnost) a pevnosti lepených spojů, použitelnost pro dřevěné kompozity a ovlivnění nasákavosti a navlhavosti [25].

4.2 HYDROFOBIZACE DŘEVA

Jak již bylo uvedeno, jedním ze zásadních faktorů, ovlivňujících fyzikálně-mechanické vlastnosti a trvanlivost dřeva ve stavebních konstrukcích, je vlhkost. S její rostoucí hodnotou dochází k nežádoucím změnám některých pevnostních i fyzikálních vlastností dřeva a stoupá riziko jeho napadení dřevokaznými houbami. Expoziční podmínky, kterým je dřevo vystaveno, určují jeho životnost [4]. Zejména cyklické změny vlhkosti ve dřevě iniciují vznik vnitřních napětí, v jejichž důsledku vznikají trhliny, způsobující snížení únosnosti dřevěné konstrukce a usnadňující pronikání biologických degradačních činitelů do dřeva.

Aplikace vodoodpudivých látek – tzv. hydrofobizátorů – na povrch dřeva zvyšuje jeho objemovou stabilitu, účinně chrání povrch dřeva před povětrnostním stárnutím, před změnou barevnosti povrchu, vznikem železitých skvrn při kontaktu s kovy, hnilobou a plísněmi, apod. [25, 82].

K prvnímu většímu rozšíření povrchové úpravy dřeva hydrofobizátory došlo v USA a dnes se v této zemi řadí mezi poměrně běžně používané technologie. Důvodem je pravděpodobně i to, že v roce 1999 zde byly publikovány [82] výsledky dlouhodobých (20-ti letých) expozičních testů. V současné době není v Evropě aplikace hydrofobizátorů dřeva hojně aplikovaná a i na našem území je stále málo známá a téměř nepoužívaná. Na trh ovšem začínají pronikat zahraniční produkty, aplikovatelné zejména na dřevěné fasády, venkovní dřevěné podlahy, apod.

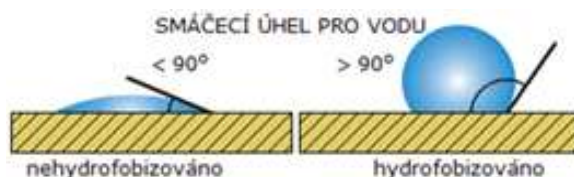
Dřevo je organická, hygroskopická, heterogenní hmota se specifickou anatomí ve své struktuře. Voda se ve dřevě pohybuje v mikrokapilárách a makrokapilárách. Přičemž makrokapilárami se pohybuje voda volná, mikrokapilárami se pohybuje voda vázaná. Voda vázaná se nachází v buněčných stěnách a vyskytuje se ve dřevě při vlhkostech 0 – 30 %. Voda volná ve dřevě vyplňuje lumény buněk a mezibuněčné prostory [18, 30]. Při vlhkosti dřeva cca 28 – 30 % hovoříme o tzv. bodu nasycení vláken, což charakterizuje stav, kdy dřevo již nepřijímá vodu vázanou, ale pouze vodu volnou. Největší objemové změny a snížení pevnosti nastávají u dřeva při vlhkosti do bodu nasycení vláken.

Dřevo umístěné v interiéru a vystavené pouze vzdušné vlhkosti málokdy dosáhne bodu nasycení vláken. Při použití dřeva v exteriéru dochází k tzv. povětrnostnímu stárnutí [25, 82]. Povětrnostní stárnutí představuje proces, ve kterém se vzájemně kombinují účinky vody a vlhkosti prostředí, povětrnostní abraze a účinky UV záření. Při procesu povětrnostního stárnutí ztrácí dřevo nejdříve barviva a lignin, poté následuje deformace a destabilita povrchových vláken. Rychlost degradace závisí na druhu dřeviny a intenzitě degradačních faktorů [25, 82]. Zvýšená vlhkost dřeva také tvoří vhodné podmínky pro výskyt

biologických degradačních činitelů. Tyto organismy mohou způsobit úplný rozklad dřevní hmoty.

Hydrofobizací nazýváme takovou změnu fyzikálně-chemických vlastností ošetřovaného materiálu, která na rozhraní pevné látky a plynného prostředí podstatně zvyšuje tzv. smáčecí úhel pro vodu.

Hydrofobizátory jsou látky schopné zvýšit povrchové napětí materiálu, a tím i smáčecí úhel pro vodu (obr. 4). Tyto látky se používají k ochraně dřeva ve venkovním prostředí a tam, kde je nebezpečí poškození dřeva zvýšenou vlhkostí, vlhkostními deformacemi dřeva, v nepřístupných zabudovaných konstrukcích, na exponované venkovní obklady, apod. Hydrofobizátory zpomalují příjem vody dřevem, zvyšují objemovou stabilitu dřeva a některé hydrofobizační prostředky působí jako prevence proti plísním, dřevokaznému hmyzu a jiným dřevokazným mikroorganismům. Působení vody ve formě páry ve dřevě není hydrofobizací výrazně ovlivněno [25, 78, 82]. Většina hydrofobizátorů však není sama o sobě účinná jako ochrana před dřevokaznými houbami, proto bývají hydrofobizátory kombinovány s účinnými látkami působícími jako fungicid.



Obr. 4: Smáčecí úhel pro vodu na hydrofobizovaném a nehdrofobizovaném povrchu [67]

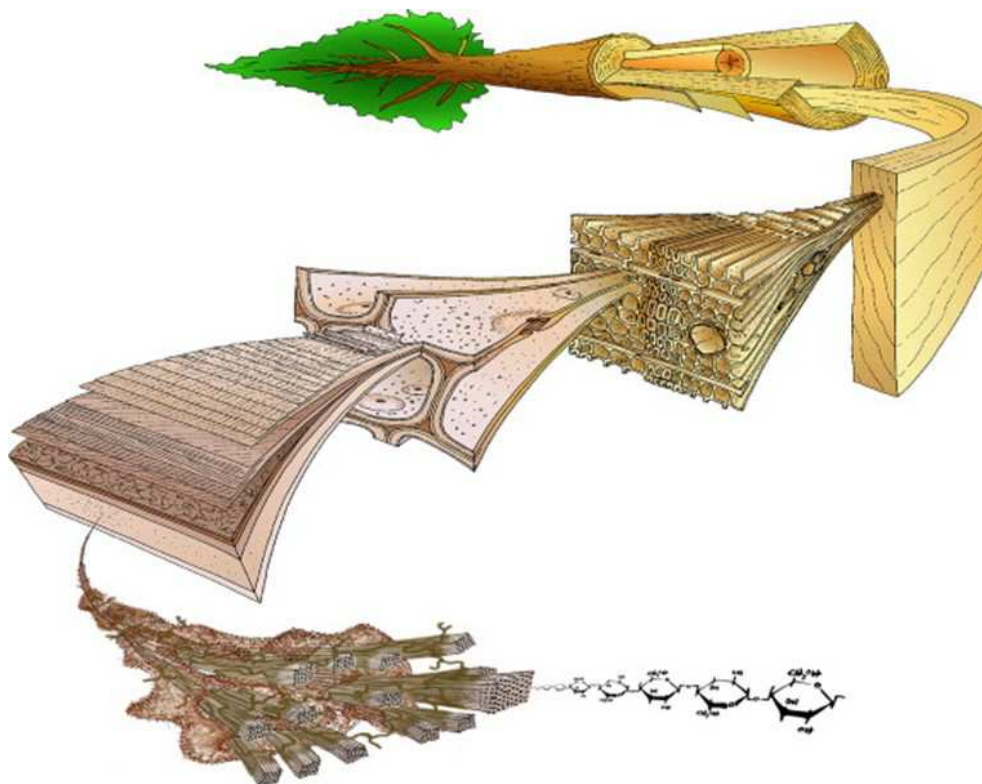
Povrchová hydrofobizace se nejčastěji používá pro dřevo vystavené vlivům povětrnosti bez trvalého styku se zemí (třída použití 3 dle ČSN EN 335). Užívá se i tam, kde je dřevo umístěno v nepřístupných, obtížně kontrolovatelných a nevětraných prostorech, v místech s nebezpečím zatékání, kondenzace vodních par apod. (třída použití 2 dle ČSN EN 335) [4]. Povětrnostní stárnutí dřeva s hydrofobizovaným povrchem se svým charakterem podobá neošetřenému dřevu, proces je však mnohem pomalejší [82].

4.3 TRANSPORT CHEMICKÝCH LÁTEK DO STRUKTURY DŘEVA

Při ošetřování dřeva minerálními látkami je důležité rozumět dynamice a intenzitě příjmu daného roztoku. Transport chemických látek je ovlivněn [23, 25]:

- strukturou dřeva – impregnovatelností konkrétní dřeviny, propustností v jednotlivých anatomických směrech, schopností fixace ochranného prostředku atd.;
- vlhkostí dřeva – zejména ovlivněním difúzních a tlakových transportních sil a množstvím volných pórů umožňujících příjem ochranného prostředku;
- aplikačními vlastnostmi ochranného prostředku (především fyzikálně – chemickými);
- hybnými transportními silami – tlakovými a difúzními.

Chemické ochranné prostředky po kontaktu s povrchem pronikají do struktury dřeva makrokapilární sítí lumenů buněk, případně mikrokapilárami buněčných stěn. Jednotlivé strukturální jednotky dřeva svou vodivou funkcí ovlivňují transport živin u živých stromů, ale i celkovou vodivou funkci materiálu. Jelikož musí být zohledněna i orientace těchto elementů v podélném i radiálním směru, jejich štíhlost a heterogenita, je transport chemických látek poměrně složitým procesem [23, 25, 33].



Obr. 5 Hierarchické uspořádání stavby jehličnatých dřevin
(University of Canterbury, grafické zpracování M. Harrington) [41]

Geometrická a morfologická struktura dřeva (obr. 5) ovlivňuje vnikání ochranného prostředku následujícími způsoby [23, 25]:

- vnější tvar dřevěného prvku (geometrie dřeva) – ovlivňuje intenzitu transportu, průnik a příjem ochranného prostředku kladně (při velkém poměru čelních ploch k bočním – radiálním a tangenciálním) nebo záporně (u objemných těles s malým povrchem);
- pórovitost dřeva – značně ovlivňuje maximální příjem, ale na kinetiku průniku a příjmu látky podstatný vliv nemá, jelikož tyto transportní parametry jsou dány průměrem a propojením jednotlivých vodivých elementů;
- transport v podélném směru – je nejintenzivnější, u listnatých dřevin jsou důvodem cévy většího průřezu bez výskytu thyl a také podélný parenchym, u jehličnatých je to díky tracheidám s otevřenými dvojtečkami;
- transport v příčných směrech u listnatých dřevin – je díky radiální orientaci dřevných kanálků intenzivnější v radiálním směru než ve směru tangenciálním;

- transport v příčných směrech u jehličnatých dřevin – často nabývá větší intenzity v tangenciálním směru, důvodem je:
 - u surového mokrého dřeva výskyt propojeného systému z otevřených dvojteček zejména v jarním dřevě;
 - u přirozeně suchého dřeva s vlhkostí pod bod nasycení vláken výskyt propojeného systému z dvojteček letního dřeva, které zůstávají otevřeny i po ztrátě vody volné, ovšem propustnost je v tomto případě nižší, protože došlo k uzavření dvojteček jarního dřeva;
- transport v bělovém dřevě – je intenzivnější než v jádrovém dřevě, nepravém jádře nebo zralém dřevě zejména z důvodu výskytu thyl v cévách jádra a nepravého jádra listnáčů, většího množství extraktivních látek v jádře (zvyšují smáčecí úhel vodných roztoků na povrchu buněk) a u jehličnanů z důvodu uzavření dvojteček tracheid ve zralém dřevě.

Anatomická i molekulární struktura taktéž ovlivňuje transport látek ve dřevě. Difúze ve vodě rozpustných účinných složek v prostředí vody vázané je ovlivněna anatomickou stavbou buněčných stěn dřeva. Významným faktorem je v tomto případě struktura mikrokapilár (prostorů mezi elementárními fibrilami a fibrilami s průměry 10 až 80 nm) a submikrokapilárních štěrbin (prostorů cca 1 nm v elementárních fibrilách), která ovlivňuje pronikání složek v rámci buněčných stěn. Do buněčných stěn obecně pronikají snadněji látky polární s menší molekulovou hmotností a méně polární látky s vysokou molekulovou hmotností [23, 25]. Naopak interakce látek se stavebními a doprovodnými složkami dřeva, během transportu i při jejich záměrné fixaci, je závislá na molekulární struktuře dřeva.

Z hlediska impregnovatelnosti je dřevo charakterizováno pomocí aktivní plochy dřeva pro transport látek – tedy plochy, jež je aktivně zapojena do příjmu ochranného prostředku. Významný je tento parametr i při popisu transportních procesů, zejména toku kapalin a difuzi jednotlivých složek ve dřevě. Aktivní plocha pro transport látek závisí na typu a počtu vodivých buněk v dané ploše a jejich propojení, průřezu lumenů buněk a jejich thylataci, stupni uzavření dvojteček a vlhkosti dřeva [23, 25, 33]. Hodnota aktivní plochy není zpravidla tabelována, jelikož díky heterogenitě dřeva často nenabývá stejných hodnot v rámci jedné dřeviny i jednoho anatomického směru. Hodnoty tohoto parametru také od povrchu do hloubky klesají. Cíleně však lze tento parametr u těžko impregnovatelných dřevin měnit mechanickým (např. napichováním noži a jehličkami), případně fyzikálním, nebo biologickým zásahem [25, 33].

Nejčastěji se pro ošetření dřeva využívají kapalné ochranné prostředky (vícesložkové systémy) ve formě pravých roztoků anebo disperzních systémů (emulzí a suspenzí). Tyto kapalné systémy lze charakterizovat příslušnými parametry, které slouží pro popis jejich transportu dřevem. Odlišnosti ve výsledném pronikání používaných ochranných prostředků kapalin do dřeva jsou způsobeny zejména následujícími charakteristikami [25, 33]:

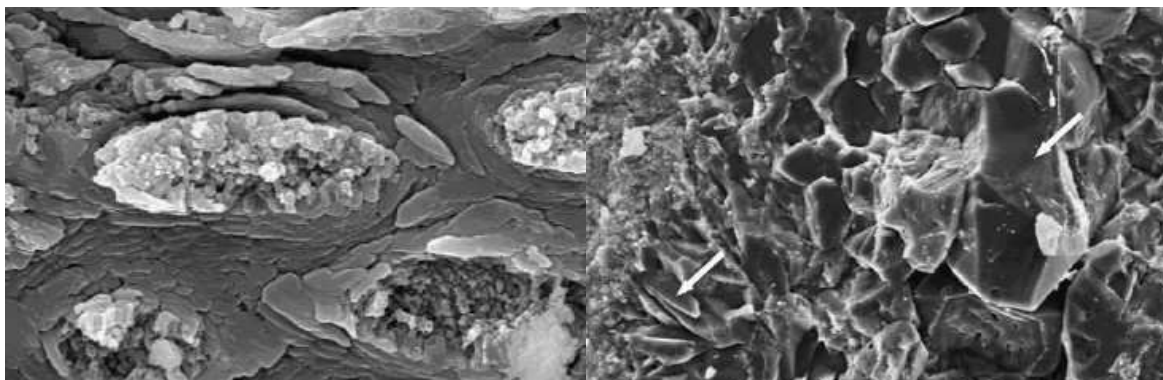
- rozpustnost účinných složek – nabývá různých hodnot pro jednotlivé látky a rozpouštědla, zvýšení rozpustnosti lze dosáhnout přidávkem aditiv nebo zvýšením teploty pod limitní teplotu;
- dynamická viskozita kapalin – charakterizuje vzájemné tření částic kapaliny (molekul nebo disperzních částic), které se projevuje jako odpor částic kapalin proti pohybu i celkový odpor kapaliny proti hybným silám toku a ovlivňuje

zejména tok ochranného prostředku do dřeva, snížení dynamické viskozity lze docílit zvýšením teploty, nebo ředěním;

- povrchové napětí kapalin – definuje schopnost smáčet vnější povrch dřeva i povrch buněk ze strany lumenů, a tudíž ovlivňuje intenzitu a kapacitu průniku kapalin do dřeva především u beztlakých technologií, snížení povrchového napětí lze docílit přidavkem povrchově aktivních látek;
- polarita jednotlivých složek – ovlivňuje transport do buněčných stěn a lumenů buněk, přičemž silněji reagují s dřevní hmotou polárnější látky a naopak při stejné dynamické viskozitě snáze pronikají nepolární organické látky, obdobně ovlivňuje transport roztoků afinita k $-OH$ i jiným funkčním skupinám dřeva, prostorová velikost jednotlivých molekul, nebo disperzních částic;
- velikostí disperzních částic v ochranném prostředku – ovlivňuje transport látky přes ztenčeniny buněk, především membrány ztenčenin;
- hmotnost částic kapalných systémů – působí tak, že při difúzi ochranného prostředku mají za konstantní teploty všechny molekuly stejnou kinetickou energii a tedy molekuly nižších hmotností difundují rychleji [20];
- difúzní koeficient – je významný především u difúzních a tlakově – difúzních metod, přičemž intenzita a rovnoměrnost difúze je určena difúzními koeficienty jednotlivých složek a stupněm vyplnění lumenů i buněčných stěn dřeva vodou, difúzní koeficient lze navýšit rostoucí teplotou bez poklesu vlhkosti.

4.4 VLIV MINERALIZACE NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI DŘEVA

Při usazování minerální složky je makroskopický vzhled dřeviny zachován, na mikroskopické úrovni dochází ve struktuře dřevní hmoty k usazování nejčastěji křemičitých částic, a výsledná struktura má pozměněný charakter (obr. 6). Při mikroskopickém hodnocení přirozeně mineralizovaného dřeva je nejčastěji sledován stav původní organické matrice, druh a množství minerálních částic a jejich lokalizace (v lumenech nebo buněčných stěnách). U plně mineralizovaného dřeva jsou kromě strukturních parametrů materiálu sledovány také fyzikální veličiny, jako je objemová hmotnost, pórovitost apod. [53, 57]. Stanovení mechanických parametrů, vzhledem k omezenému rozsahu nálezů přirozeně mineralizovaného dřeva a jeho použití, je spíše raritní [19].



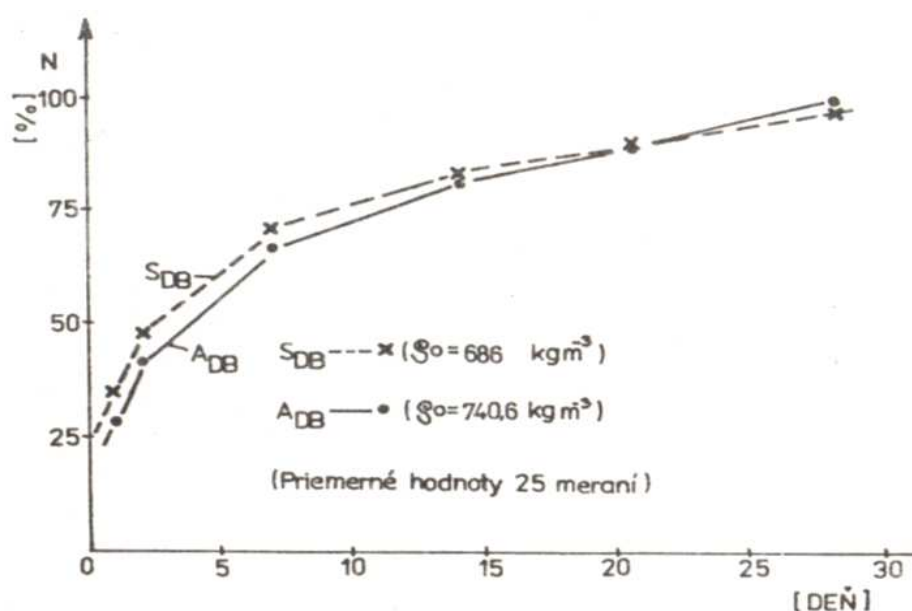
a)

b)

Obr. 6 Elektronová mikroskopie mineralizovaného dřeva: a – zaplnění teček jemnozrnnými minerálními novotvary, b – tvorba výrazných mnohostěnných krystalů (označeno šipkami) s prokázaným obsahem Si a Fe [53]

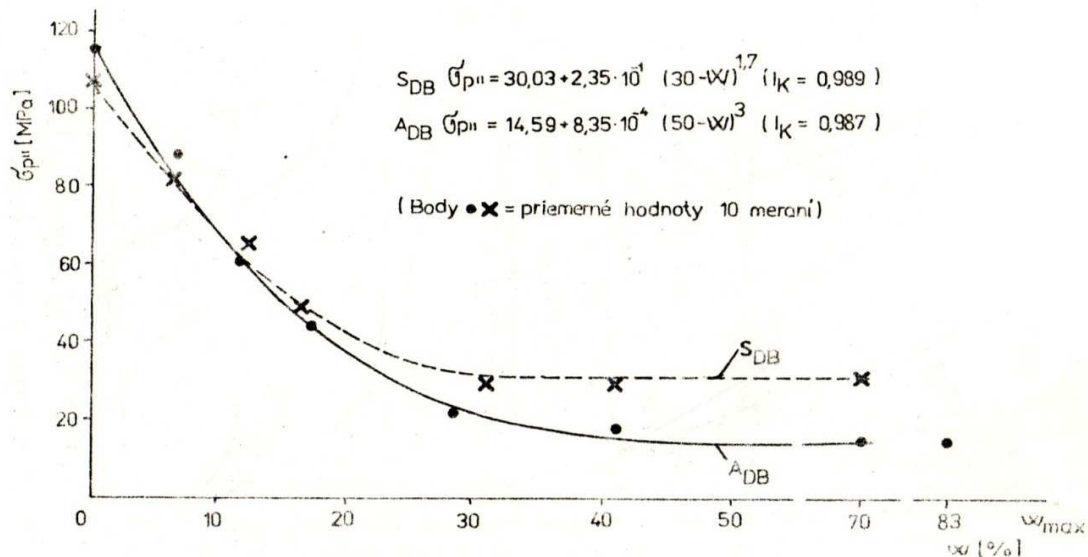
Jedna z mála publikovaných prací [19] prezentuje výsledky výzkumu struktury, a fyzikálních a mechanických vlastností subfosilního (částečně mineralizované) až 8000 let starého dubového dřeva nalezeného v oblasti Gabčíkovo na Slovensku. Kromě mineralizace probíhaly ve zmíněném materiálu také procesy korozní (depolymerizace celulózy, deacetylace polysacharidů, změny ve struktuře ligninů, humifikační procesy atd.) a výsledné vlastnosti materiálu jsou proto kombinací více působících jevů. U jednotlivých zkoušek byly porovnávány výsledky pro dub subfosilní a současný dub letní, jejichž struktura byla podobná.

Z řady získaných výsledků lze vyzdvihnout především porovnání kinetiky nasákavosti (obr. 7) a závislosti pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny na vlhkosti (obr. 8). Jak je patrné z grafu na obr. 7, znázorňujícího kinetiku nasákavosti, subfosilní dřevo zpočátku přijímá vodu pomaleji právě z důvodu výskytu minerálních usazenin.



Obr. 7 Kinetika nasákavosti subfosilního (A_{DB}) a současného (S_{DB}) dubového dřeva [19]

Z grafu 8, znázorňujícího pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, je při absolutních vlhkostech pod 10 % patrné, že subfosilní dub vykazuje vyšší pevnostní parametry, než dub současný. S rostoucí vlhkostí naopak pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny současného dubu převyšuje pevnosti dubu subfosilního. Tento jev je pravděpodobně způsoben narušením lignin – sacharidového komplexu vlivem korozních dějů [19].



Obr. 8 Závislosť tlakovej pevnosti rovnobežne s vlákny na absolútnej vlhkosti vzorků dřeva subfossilního (A_{DB}) a současného (S_{DB}) dubu [19]

Jak již bylo uvedeno, předpokládá se, že i částečně mineralizované dřevo bude vykazovat za určitých podmínek zvýšenou trvanlivost. Předpokládá se i určitý vliv mineralizace na mechanické vlastnosti materiálu – zejména na pevnosti a moduly pružnosti. Mineralizace taktéž ovlivňuje charakteristiky spojené s příjmem vody a vlhkostní objemové změny materiálu. Konkrétně zvýšení odpudivosti povrchu dřeva vůči vodě a olejům již bylo sledováno pro aplikaci nanopovlaků, nebo modifikací na bázi fluorokřemičitanů, boritanů nebo s využitím tzv. acylace [35, 46, 47].

Na chemické ochranné prostředky pro ošetřování dřeva jsou obecně kladeny následující požadavky [25]:

- rychlé a rovnoměrné vnikání přípravku do dřeva za podtlaku, přetlaku, nebo atmosférického tlaku;
- kvalitní nanášení na povrch dřeva;
- stabilita ve dřevě (slabá vyluhovatelnost, nízká těkavost);
- fyzikálně – chemická stabilita (dobrá skladovatelnost bez tvorby usazenin, chemická stabilita bez tvorby látek s nižší účinností při působení povětrnostních vlivů nebo v kontaktu s jinými materiály);
- zachování nebo zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (bez koroze lignin – sacharidové matrice, bez zvýšení navlhavosti, nasákavosti nebo elektrické vodivosti, zachování estetického vzhledu);
- kombinovatelnost s jinými doprovodnými látkami dřevařského průmyslu (nedochází ke snížení pevnosti lepených spojů, poškození povrchových úprav atd.);
- velká škála použití a cenová i tržová dostupnost (aplikovatelnost pro různé vlhkosti materiálu, teplotní pásma, technologické zařízení, splnění legislativních požadavků apod.).

5. METODY VÝZKUMU MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

Základními charakteristikami, které je nutno definovat v rámci přirozené i umělé mineralizace dřeva, jsou parametry definující mineralizační faktor. K tomuto účelu je vhodné využít chemických a strukturálních analýz na vzorcích, systematicky odebraných z celých profilů mineralizovaného dřeva. Prováděné zkoušky musí být však primárně podloženy základními informacemi o původním rostlém materiálu [44].

Způsob přípravy analytických nebo zkušebních vzorků se liší podle konkrétní použité metody. Při aplikaci elektronové mikroskopie, která patří v průzkumu mineralizace k nejčastěji používaným metodám, jsou například dřevěné materiály zpracovány tak, aby bylo možné rozpoznat surovinu v nezměněném stavu. Díky tomu je možné pozorovat strukturu mineralizovaného dřeva se zachovalými strukturálními jednotkami dřevní hmoty a současně lokalizovat rozložení minerální složky v materiálu. SEM bývá při výzkumu přirozeně mineralizovaného dřeva často doplněna o rentgenovou mikroanalýzu za účelem identifikace prvkového složení jednotlivých částí, potvrzení biologického významu chemických i strukturálních změn na mikroskopické úrovni ve vyšších rostlinách, v našem případě v silicifikovaném dřevě [51, 52, 66], i odvození geologického původů vzorků i jejich tepelného zatížení [57].

Kromě SEM se využívá i jiných analytických metod, např. IČ spektroskopie, termických analýz, rentgenové difrakční spektrometrie apod.

U částečně nebo plně mineralizovaného dřeva pro stavební účely je nutno stanovit jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti, zejména:

- pevnostní vlastnosti;
- vlhkost a vlhkostní změny rozměru;
- trvanlivost.

Stanovení pevnostních charakteristik lze u většiny materiálů provádět jak nedestruktivními tak destruktivními metodami. Při nedestruktivním zkoušení získáme sice větší objemy měřených dat, které lze následně statisticky vyhodnotit, jedná se však pouze o výsledky orientační, s nižší přesností ve srovnání s výsledky destruktivních testů. Destruktivní metody poskytují přesnější informace o vlastnostech vyšetřovaného materiálu, při zkoušení však dochází k porušení zkušebních těles a zkoušky proto nelze opakovat.

Z výše uvedených důvodů se často provádí tzv. upřesněné nedestruktivní zkoušky, kdy na jednom vzorku je provedeno zkoušení destruktivní i nedestruktivní, a z poměru získaných hodnot je dle (1) vypočítán korelační součinitel α [26].

$$\alpha = \frac{f_{DT}}{f_{NDT}} \quad [-] \quad (1)$$

, kde:

f_{DT} ... výsledek destruktivní zkoušky;
 f_{NDT} ... výsledek nedestruktivní zkoušky.

U dřevěných konstrukcí jsou prováděna nedestruktivní (semidestruktivní) tvrdoměrná měření a z naměřených hodnot je pomocí vhodných korelací vypočtena pevnost materiálu. K těmto účelům se nejčastěji používají kladívka Pilodyn a tvrdoměry dle Janky (upravené Poldi kladívko). Pevnost dřeva lze stanovit na odebraných vzorcích také laboratorně, ovšem tato metoda je chápána již jako čistě destruktivní. U dřeva lze pevnost stanovovat destruktivně na vzorcích malých a bezvadých (metoda použitelná pouze pro listnaté dřeviny), u nichž je nutno redukovat naměřenou pevnost v závislosti na vyskytujících se vadách, nebo na vzorcích konstrukčních rozměrů dle ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností [7].

Při zabudování konstrukčních profilů v konstrukci dochází zejména k působení vlhkosti. Tuto expozici lze charakterizovat tzv. třídami použití [4], přičemž klíčovým je pro hodnocení vlhkového chování samotná vlhkost materiálu. Vlhkost materiálu lze stanovit několika způsoby – destruktivně odběrem vzorků pro gravimetrickou metodu, nebo nedestruktivně s využitím elektrické odporové (obr. 9) nebo kapacitní metody. V případě chemického ošetření dřeva mohou být však výsledky nedestruktivního měření zkresleny, jelikož chemické sloučeniny obvykle ovlivňují i elektrické charakteristiky materiálu.



Obr. 9 Hrotový odporový vlhkoměr

K významným sledovaným parametrům, souvisejícím s vlhkostí, náleží vlhkovostní objemové změny, konkrétně sesychání a bobtnání, nebo smáčecí úhel povrchu. V případě hydrofobních ošetření a modifikací, je vhodné sledovat také transfer vlhkosti při konkrétních podmínkách pod i nad bodem nasycením, které mohou nastat při aplikaci prvku do stavby [41, 42, 43]. Jako příklad lze uvést jednostranné působení vlhkosti v případě obkladových materiálů, nebo stropních trámů uložených na zdivo [64]. U povrchového ošetření lze porovnat vlhkovostní profil s jinými druhy nátěrů na dřevo, které taktéž ovlivňují příjem vlhkosti [63].

Trvanlivost dřevěného materiálu je hodnocena na základě umístění prvku v daném prostředí, které je také definováno prostřednictvím tříd použití (ČSN EN 335 Trvanlivost

dřeva a materiálů na bázi dřeva - Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva) [4]. Cílenou expozicí dřevěných vzorků za přesně definovaných vlhkostních a teplotních podmínek, odpovídajících jednotlivým třídám, můžeme laboratorně stanovovat změnu vlastností v závislosti na prostředí. Dále lze hodnotit trvanlivost vůči působení povětrnostních vlivů v reálných podmínkách nebo urychlenými testy (např. ČSN EN 330 [3]) nebo vůči biologickým činitelům (např. dle ČSN EN 113 [2], ČSN EN 15457 [11]).

Principy metod, které byly použity v praktické části práce, jsou uvedeny v následujících kapitolách.

5.1 METODY PRO IDENTIFIKACI A POPIS MINERALIZACE

5.1.1 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Jednou z efektivních a často používaných metod pro vyšetřování mineralizace dřevní hmoty je elektronová skenovací mikroskopie (SEM), která umožňuje zobrazit mikrostrukturu materiálu při relativně velkých zvětšeních, zhodnotit stav organické matrice a identifikovat vzniklé minerální novotvary a jejich umístění v různých směrech sledovaného preparátu [53, 57, 66]. Vzorky mineralizovaného dřeva pro SEM jsou připravovány tak, aby bylo možné identifikovat a lokalizovat minerální částice bez poškození dřevěné matrice [22]. Doplnění SEM o metodu energetické disperzní rentgenové spektroskopie (EDX) umožňuje také stanovit prvkové složení konkrétních složek nebo partií materiálu. Kombinací uvedených metod byly např. u přirozeně mineralizovaného dřeva identifikovány jemné částice půdních minerálů v lumenech protáhlých buněk a mnohostěnné krystaly, zejména křemene, u povrchových trhlin a štěrbin. Byl tak vysloven předpoklad, že růst krystalů SiO_2 je zodpovědný za částečnou destrukci buněčné stěny [53].

SEM je analogií klasické optické mikroskopie, kde však na místo zdroje světla je elektronová tryska a místo optické čočky jsou čočky elektromagnetické (cívky). Emitovaný proud primárních elektronů po dopadu na povrch zkoumaného vzorku způsobuje řadu fyzikálních jevů, které poskytují důležité informace o analyzované látce [15].

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) využívá ke zobrazení vzorku:

- sekundární elektrony (SEI – Secondary Electron Imaging);
- odražené elektrony (BEI – Back Scattered Electron Imaging, nebo BSE);
- katodoluminiscenční záření (CL).

Zdrojem elektronů je žhavená katoda (wolframový drát nebo tyčinka z hexaboridu lanthanu). Vzniklý svazek elektronů je usměrněn elektronovou optikou a těsně nad vzorkem dochází k jeho vychýlení defleční cívkou tak, že přejíždí po řádcích celou plochu vzorku. Odražené nebo sekundární elektrony jsou detektorem převáděny na optický signál, který je zobrazen na příslušném zařízení. Dalšími důležitými charakteristikami SEM je potřebný pracovní prostor ve vakuu (tlak pod 10^{-6} Pa) a z důvodu zajištění vodivosti vzorku jejich vodivé pokovení a také uzemnění [15, 22].

Mikroskopický obraz vzniká na základě zmíněné emise sekundárních, nebo odražených elektronů, která vzniká v závislosti na chemickém složení jednotlivých částí vzorku. Při zobrazení jednotlivých částí vzorku platí, že vyšší atomové číslo způsobuje větší odraz elektronů, a tím i jejich světlejší zbarvení. S využitím tohoto principu lze odlišit jednotlivé minerály, vyhledat rudní minerály v hornině, najít minerální částice v organické

matrici, apod. Metoda BEI vykazuje vzhledem k SEI nižší rozlišovací schopnost (odražené elektrony je nutné vybudit z větší hloubky než ty sekundární). Hlavní výhodou SEM mikroskopů je rozlišovací schopnost cca 2 – 10 nm a zvětšení až 200 000×. Protože v případě SEM nemusí elektrony projít vzorkem, lze pro měření použít i tlustší preparáty (např. leštěné výbrusy a nábrusy, neupravené vzorky pro studium morfologie atd.). V případě použití EDX sondy je zkoumáno spektrum emitovaného RTG záření, na jehož základě lze stanovit chemické složení určitého sledovaného bodu [15, 22].

5.1.2 TERMICKÁ ANALÝZA

Metody termické analýzy jsou založeny na principu sledování hmotnostních a tepelných změn při zahřívání analyzovaného vzorku. Je tak možno analyzovat složení vzorku pomocí hodnocení fázových přeměn.

Termínem termická analýza jsou označovány analytické metody, které studují vlastnosti látek v závislosti na tepelném působení. Vzorek umístěný v peci je teplotně zatěžován pomocí definovaného teplotního zatížení a měřicí zařízení zaznamenává simultánně změnu sledované veličiny a teploty. Pro interpretaci získaných termálních křivek existují v současnosti již poměrně rozsáhlé knihovny termálních křivek [24, 75]. Nejčastěji je termická analýza využívána pro stanovení fázového složení materiálu [28, 29], k čemuž slouží následující metody:

- termogravimetrická analýza (TG), sledující změny hmotnosti zkoumaného vzorku;
- diferenční termická analýza (DTA), hodnotící rozdíl teploty mezi zkoušeným a referenčním vzorkem;
- diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), sledující tepelný tok, který je třeba dodat do systému pro udržení stejné teploty zkoušeného a referenčního vzorku.

Kromě fázového složení materiálu je možné zkoumat změny mechanických, elektrických, magnetických, nebo jiných vlastností v závislosti na působící teplotě [28,29].

Moderní přístroje umožňují simultánní měření několika veličin, čímž získáme přehled o různých charakteristických znacích materiálu. Typickým příkladem je kombinace termogravimetrické a diferenční termické analýzy (TG/DTA), případně termogravimetrické analýzy a diferenční skenovací kalorimetrie (TG/DSC) [29].

Základním výstupem jsou exotermické a endotermické jevy pozorované na křivce tepelného toku. Můžeme tak určit počet změn a jejich velikost. Společně s vyhodnocením křivky termogravimetrické lze říci, zda se jedná o změny rozkladné, kdy dochází například k uvolňování plynů ze sloučeniny, nebo pouze o změny strukturní, jako je změna krystalové struktury [28].

Při podrobnější analýze s využitím derivačních křivek můžeme stanovovat počáteční a koncovou teplotu přeměny a také její rychlost. Derivační křivky také v některých případech umožní rozlišit částečně se překrývající jevy. Při určení teplotních mezí není obtížné změřit hmotnostní změny, ze kterých lze následně spočítat rozkladné množství materiálu pro kvantitativní analýzu. Tuto analýzu lze provést také z pohledu tepelného toku. Je možné integrovat plochu píku zaznamenávajícího tepelný tok přeměny a určit množství dodaného

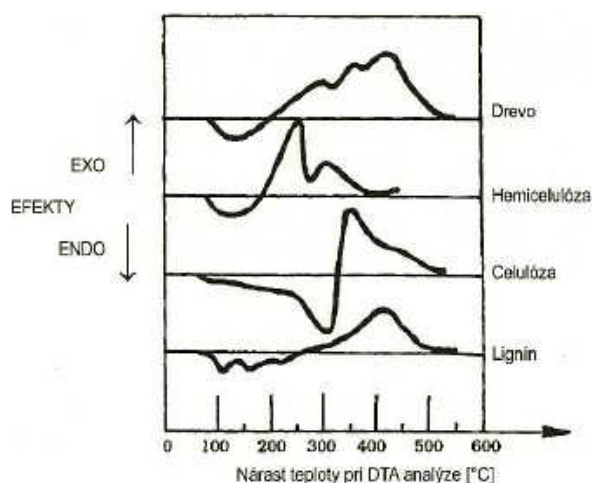
nebo spotřebovaného tepla. Při takovéto analýze je však již nutno pracovat s termodynamickými pochody při přeměně fází [28].

Termická analýza představuje efektivní analytický nástroj také pro studium dřeva, neboť tento vysoce energetický materiál s vysokým obsahem hořlavých složek se za zvýšené teploty poměrně snadno rozkládá. Jsou sledovány zejména procesy související s termickým rozkladem základních složek, tedy celulózy, hemicelulózy a ligninu. Tyto látky se z hlediska svého zastoupení, strukturního uspořádání i chemického složení podílejí různým způsobem na stavbě jednotlivých strukturních elementů a liší se i v případě různých druhů dřevin. Z tohoto důvodu je také poměrně složité nalézt data s univerzální platností, která by popsala zastoupení jednotlivých složek a konkrétní termické pochody s nimi související. Přibližné teplotní meze, v nichž probíhají základní rozkladné reakce dřeva, uvádí tab. 2 [25].

Tab. 2 Teplotní meze při termické degradaci dřeva [25]

Teplotní meze	Reakce
< 66 °C	Termická degradace v podstatě neprobíhá
66 °C – 110 °C	Některé reakce mohou probíhat v závislosti na délce ohřevu, ale bez významného vlivu na strukturu a vlastnosti
< 150 °C	Termickou degradací je značně ovlivněna struktura i vlastnosti dřeva
< 200 °C	Výrazný exotermický rozklad hemicelulózy, částečný rozklad již při teplotách pod 200 °C
< 300 °C	Depolymerizace celulózy za vzniku levoglukózanu a pak hořlavých plynů
< 300 °C – 400 °C, ale i vyšších	Výrazný exotermický rozklad ligninu vlivem štěpení vazeb alkyl-alkyl, alkyl-aryl, éterových i C-C vazeb aromatického jádra

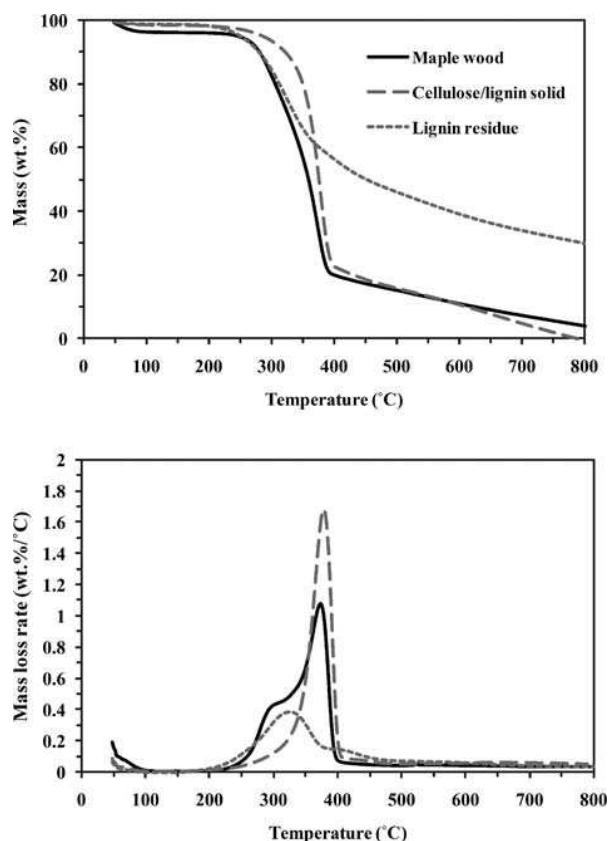
Kromě teploty hraje důležitou roli i obsah kyslíku, který může silně exotermicky reagovat s aktivovanými složkami dřeva při značných změnách hmotnosti vzorku – hoření. Při absenci kyslíku naopak dochází k tzv. pyrolýze, která až na reakci s kyslíkem (hoření) probíhá v podstatě obdobně se stejnými teplotami rozkladu jednotlivých složek. Provádění termické analýzy v redukční atmosféře může být proto z hlediska rozlišení jednotlivých jevů na příslušných křivkách výhodnější. Na obr. 10 je uveden přibližný tvar DTA křivek dřeva a jeho jednotlivých složek [25].



Obr. 10 Schémata energetických efektů při termickém rozkladu dřeva a jeho složek [25]

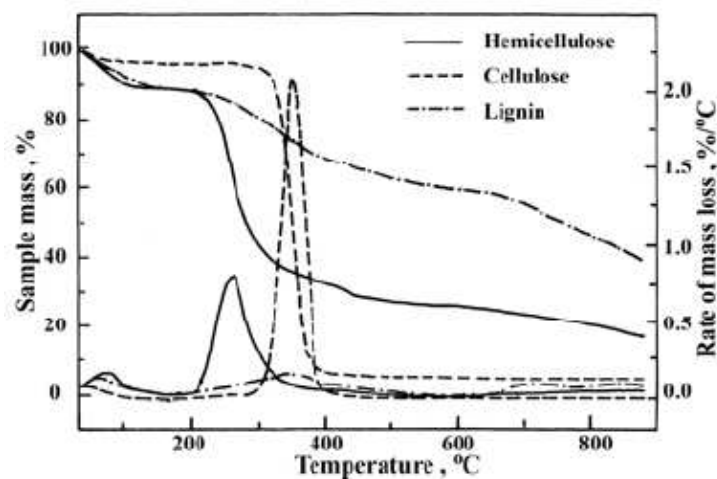
Průběh těchto křivek je ovlivněn mnoha parametry, přičemž nezanedbatelný vliv má i druh dřeviny, základní principy však obecně platí. Z uvedených schémat také vyplývá, že endotermické reakce (ENDO) mají obvykle charakter iniciačních fází, zatímco exotermické reakce (EXO) odpovídají naopak fázím propagačním.

Jako příklady aplikace metod termické analýzy pro studium dřeva jsou zde uvedeny změny na křivkách TG nebo DTG při odstranění některých složek z matrice javorového dřeva (obr. 11) [49] a obdobné křivky jednotlivých složek dřeva získaných extrakcí z původní matrice (obr. 12) [36].



Obr. 11 TG a DTG křivky rostlého javorového dřeva (plně černě), pevného zbytku po extrakci hemicelulózy (celulózo – ligninová pevná látka, čerchovaně šedě), a pevného zbytku po extrakci hemicelulózy i celulózy (ligninový zbytek, tečkovaně šedě) s rychlostí ohřevu $15\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ od 50 °C do 800 °C [49]

Dalším příkladem mohou být studie, věnované termické dekompozici jedné vybrané složky dřeva a zkoumající rozdíly u jednotlivých druhů dřevin [36]. Metody termické analýzy byly využity i při hodnocení cílených ošetření dřeva, s úkolem sledovat změny hořlavosti materiálu, primárně patrné z posunu křivky sledující změny hmotnosti (TG) [80].



Obr. 12 TG a DTG křivka tří základních organických složek dřeva [36]

Kromě výše uvedených analytických metod je možné pro popis mineralizace zvolit alternativní experimentální metody, které však nejsou podloženy normovými postupy. Pro hodnocení navázání minerální složky na buněčnou stěnu lze nejlépe využít známý jev, kdy k největším vlhkostním objemovým změnám dochází v případě, kdy se voda váže přímo na buněčnou stěnu, tedy do bodu nasycení vláken [18, 23, 25, 30]. Obdobně můžeme předpokládat, že v případě, kdy se minerální látka naváže přímo na buněčnou stěnu dřeva, vzniknou u dřeva objemové změny, které i po vysušení na nulovou vlhkost budou nevratné. Naproti tomu vyplnění lumenů buněk bez vazby na buněčnou stěnu by již na absolutně suchém dřevě objemové změny zanechat nemělo.

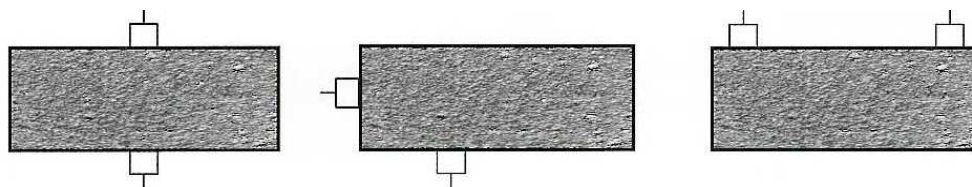
5.2 DIAGNOSTICKÉ IN SITU METODY DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Při diagnostice dřevěných konstrukcí je nutno nejprve popsat všechny vizuálně patrné vady a poruchy. Skryté vady a nehomogenity lze nedestruktivně detekovat s využitím přístrojů, pracujících na principu průchodu vlnění materiálem, především ultrazvukového a rentgenového, nebo semidestruktivním monitorováním změn mechanických vlastností podél profilu s využitím přístrojů Resistograph nebo Fractometr.

5.2.1 ULTRAZVUKOVÁ PRŮCHODOVÁ METODA

Výhodou přístrojů pracujících na bázi ultrazvukových vln je zejména nedestruktivní charakter zkoušení a také poměrně nízké prováděcí náklady. Výsledky získané pomocí elektroakustických metod mohou být využity také pro hodnocení dřevěných konstrukcí z hlediska posouzení stupně mineralizace dřeva.

U dřevěných konstrukcí se nejčastěji používá systém produkující impulzové vlnění se dvěma sondami. Umístění sond na dřevěném prvku může být: protilehlé-normální, protilehlé-šikmé nebo nepřímé-povrchové (obr. 13). Nejčastějším cílem je stanovit rychlost šíření ultrazvukových vln v daném prostředí, která závisí zejména na hustotě dřeva. V případech výskytu defektů se rychlost šíření vln snižuje, čímž lze zjistit jednotlivá poškození a vady (suky, trhliny, degradaci atd.) [26, 54, 55]. Na základě uvedeného principu je možné detekovat i partie ovlivněné ošetřením nebo modifikací dřeva.



a) přímé – protilehlé b) polopřímé – boční c) nepřímé – povrchové
 Obr.13: Umístění sond při ultrazvukové diagnostice dřevěných konstrukčních prvků [81]

Nejčastěji se používá uspořádání sond protilehlé – normální, kdy sondy jsou umístěny na stejné normále na protilehlých stranách prvku. U měření protilehlého – šikmého jsou sondy taktéž na protilehlých stranách, neleží však na téže normále. Tento způsob je využíván především u špatně přístupných konstrukcí. Místa, kam budou přikládány sondy, musí být označena. Při měření ultrazvukem je možná aplikace bočního normálního i šikmého prozvučení, dále také povrchového nebo vnitřního s využitím zapichovacích sond. Pro dřevěné konstrukce se však tyto způsoby běžně nevyužívají. Nepřímé povrchové uspořádání sond je vhodné zejména pro měření hloubky trhliny nebo hodnocení kvality povrchu, případně se aplikuje pro prvky s pouze jedním přístupným povrchem [26, 54, 81].

Pro stavební materiály se obecně používají frekvence ultrazvukového vlnění v rozsahu 20 až 500 kHz, volené na základě charakteru zkoušeného prostředí a rozměrnosti prvku. Kromě rychlosti průchodu vlnění daným materiálem může být u přístrojů s příslušným technickým vybavením zaznamenáván také obraz prošlého vlnění [26, 81].

Princip průchodové metody spočívá v tvorbě krátkých svazků tlumených mechanických pulzů, které jsou prostřednictvím jedné sondy, budiče, vnášeny do materiálu, a druhou sondou, snímačem, je vlnění zaznamenáno. Pomocí zjištěné vzdálenosti mezi sondami a doby průchodu vlnění je určována impulzová rychlost. Měření rychlosti vlnění je ovlivněno řadou faktorů, přičemž její zásadní snížení je způsobeno výskytem defektů v materiálu (trhlin, suků a poškození způsobených dřevokazným hmyzem a houbami, působením vlhkosti, UV záření apod.). Pomocí měření lze detekovat zmíněná poškození, a následně odhadnout i míru poškození zkoušeného dřevěného prvku [54, 55]. Významný vliv na výsledek měření má také orientace směru měření vzhledem k dřevěným vláknům. Obecně se uvádí následující hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových vln vzhledem ke směru vláken [55]:

- rychlost rovnoběžně s vlákny v závislosti na druhu dřeviny mezi 3500 a 5000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- rychlost kolmo k vláknům mezi 1000 a 1500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- poměr rychlostí měřených v radiálním a tangenciálním směru 5:3,95.

Je-li naměřená hodnota rychlosti šíření ultrazvuku nižší než standardní hodnoty, pak je zkoumaný dřevěný prvek označen jako degradovaný. Stupeň poškození je dán velikostí poklesu rychlosti vln. U zabudovaných dřevěných stavebních prvků se impulzová rychlost stanovuje nejčastěji ve směrech příčných (radiálním a tangenciálním) [54, 55].

Diference v rychlosti ultrazvukového vlnění jsou způsobeny i vlhkostí, s jejíž rostoucí hodnotou klesá rychlost tohoto vlnění. Dalšími méně významnými faktory ovlivňujícími rychlost ultrazvukového vlnění jsou teplota a výskyt chemických látek [54, 55].

5.2.2 METODA ODPOROVÉHO VRTÁNÍ

Odporové vrtání – Resistograph – patří mezi semidestruktivní diagnostické metody. Tato metoda se využívá zejména pro zjištění rozsahu degradace v průřezu sledovaného trámu, přičemž výsledky vypovídají pouze o stavu konkrétního měřeného místa. Odporové vrtání lze použít také ke zjištění polohy a rozměrů skrytých prvků dřevěných konstrukcí (konstrukce stropů, podlah atd.) a kontrolu dřevěných spojů [45, 54].

Princip tohoto zkoušení spočívá ve stanovení vrtného odporu proti vnikání ocelové jehly s průměrem špičky 1,5 až 3 mm a délkou až 1 m do zkoušeného materiálu. Jehla se posouvá a otáčí konstantní rychlostí a její hrot má speciální tvar, díky němuž vrtný odpor působí pouze na špičce jehly a omezuje tak tření ve vrtném kanálku. Motor přístroje během celé doby vrtání udržuje konstantní otáčky vrtací jehly, a záznam mechanického odporu lze tudíž provádět na základě měření okamžitého výkonu motoru. Vrtný odpor je závislý na hustotě dřeva, takže i u zdravého dřeva kolísá na základě pravidelného střídání jarního a letního dřeva. Při průniku jehly poškozeným materiálem vykazuje vrtný odpor výrazný pokles [45, 54].

Přístroje pracující na bázi měření vrtného odporu se využívají zejména pro určení rozsahu degradace dřevěných prvků ve vytyčených kritických místech, s jejich aplikací se ale můžeme setkat již ve fázi vyhledávání vad a poruch při předběžném stavebně technickém průzkumu. Pomocí vrtacích jehel větších délek je možné kontrolovat spoje dřevěných prvků (např. dřevěné kolíky), ale také zjišťovat např. skladbu nepřístupných dřevěných konstrukcí, především stropů.

Samotné měření probíhá pouze po dobu několika minut. Resistograph se umístí hlavou k měřenému prvku téměř pod libovolným úhlem a spustí se vrtání. Po celou dobu zkoušky je nutné přístroj udržovat ve stejné poloze, aby nedošlo k ohnutí nebo zlomení vrtací jehly. Měření je ukončeno buď po provedení vrtu určité délky, nebo v případě, kdy jehla pronikne celým prvkem [45]. Výsledný záznam měření se ukládá do paměti přístroje, případně u některých starších typů přístrojů se simultánně tiskne v měřítku 1:1 na vložený termografický papír.

Výsledkem měření je záznam vrtného odporu v závislosti na měřené délce ve formě grafu, případně tabulky hodnot. Ze získaných křivek lze stanovit střední efektivní vrtný odpor jako plochu pod křivkou vztaženou k měřené délce vzorku, nebo jako průměrný vrtný odpor pro daný vzorek. V grafickém zobrazení výsledků lze také nejlépe identifikovat případné poruchy a degradaci [45, 54].

V případě, že v grafickém záznamu dojde k zřetelnému poklesu vrtného odporu v oblasti určité délky a zároveň zůstane zachován typický sled letokruhů, je tato část prvku označena jako celkově degradovaná. Pro stanovení druhu příslušné degradace – fyzikální, biologické, atmosférické, nebo chemické, je nutné zhodnotit umístění prvku a případně provést i jiné typy zkoušek [45]. Prudkým a pouze lokálním poklesem vrtného odporu na grafickém záznamu lze detekovat trhliny, které se u dřevěných prvků vyskytují poměrně často. Lokální pokles vrtného odporu může taktéž detekovat požerky larev dřevokazného hmyzu. Tento efekt se projeví obvykle na určité dráze, jejíž délka je dána druhem dřevokazného škůdce (např. u tesaříka přibližně 0,5 cm). Za degradovanou část prvku pak označujeme oblast od zaznamenaného požerku až k povrchu vzorku [45]. Vytyčení poškozených částí umožňuje určit míru poškození zkoušené konstrukce. Na základě

zbytkového průřezu konkrétního prvku je rozhodnuto o jeho výměně, sanaci nebo ponechání.

5.3 METODY POPISU VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

Dřevo živého stromu obsahuje značné množství vody. Voda se při fotosyntetické reakci podílí na tvorbě dřevní hmoty, voda je transpiračním prostředkem a přepravuje živiny z kořenů do jeho listů. Pro konstrukční účely je však důležitý fakt, že je voda obsažena i ve dřevě zpracovaném. Je to způsobeno hygroscopicitou (navlhavostí) dřeva, která kolísá podle vlhkosti okolí (např. v listopadu je vyšší než v červenci). U dřeva můžeme proto zkoumat i jeho chování (změny hmotnosti, vlhkosti, rozměrů atd.) v závislosti na podmínkách expozice, tzv. třídách použití neboli také třídách ohrožení dle ČSN EN 335 Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva [4]. Riziko biotické degradace má s třídami ohrožení dřeva přímou souvislost – třída 1 znamená nejnižší riziko biotického poškození a 5 naopak nejvyšší pravděpodobnost znehodnocení [4, 33]:

- Dřevo v třídě ohrožení 1 se nachází zcela pod střechou, tudíž není vystaveno povětrnostním vlivům, ani působení vlhkosti (vlhkost je vždy pod 20 %).
- Pro třídu ohrožení 2 je typické umístění dřeva pod střechou, tudíž dřevo není vystaveno povětrnostním vlivům, ale jeho vlhkost může někdy překročit 20 %.
- V třídě ohrožení 3 není dřevo chráněno, čímž je vystaveno působení povětrnostních vlivů, ale není v kontaktu se zemí, nebo je jen částečně zakryto, a tudíž vystaveno opakovaně zvýšené vlhkosti. Zde je vlhkost nad kritickou hodnotou 20 % velmi častá.
- Do třídy ohrožení 4 zařídíme dřevo, které je v kontaktu se zemí nebo sladkou vodou. V tomto prostředí je dřevo vystaveno tak silné vlhkosti, že kritické hodnoty 20 % je dosaženo stále.
- Pro třídu ohrožení 5 je charakteristické dřevo v kontaktu se slanou vodou, kde vlhkost trvale překračuje hranici 20 %.

Hydrofobizační efekt organosilanů lze určit pomocí řady laboratorních metod, které lze rozdělit na [79]:

- metody zkoumající příjem vody;
- metody hodnotící smáčecí úhel a povrchové napětí;
- metody založené na hodnocení bobtnání a smrštění.

První dvě skupiny metod nejsou zpravidla normovány a mají většinou experimentální charakter. Metody zkoumající příjem vody hodnotí hmotnostní změny dřevěných vzorků při expozici v různých prostředích s definovanou teplotou a relativní vlhkostí vzduchu. Obdobně lze sledovat na základě změn hmotností i změny vlhkosti vzorků. Hodnocení smáčecího úhlu a povrchového napětí hydrofobizátorů vychází z principu jejich fungování, tedy změny fyzikálně-chemických vlastností ošetřovaného materiálu. Kvantifikovat tento jev lze pomocí určení tzv. smáčecího úhlu pro vodu. Za hydrofobizovaný povrch lze označit takový povrch, pro nějž je smáčecí úhel pro vodu větší než 90° (obr. 4).

Nejlépe popsané jsou metody zkoumající objemové změny, k nimž dochází až při vysychání buněčných stěn dřevních vláken (v rozsahu vody vázané), tedy mezi 0 a 25 – 30 % vlhkostí. Bobtnání i sesychání je lokalizováno v buněčné stěně (obr. 14) a výrazně jej

ovlivňuje orientace fibril v buněčné stěně nebo podíl sekundární buněčné stěny S_2 v buněčné stěně (až 90 %) s jejíž rostoucí hodnotou rostou i vlhkostní objemové změny.



Obr. 14 Vlhkost v buňkách dřeva a vlhkostní objemové změny [73]

Normalizovaný je postup dle americké normy ASTM D4446-08 [1], která využívá speciálního přístroje, tzv. swellometru (obr. 15). Tato norma byla použita i v této práci. Princip tohoto měření spočívá v porovnání změny rozměru u ošetřených a referenčních vzorků v tangenciálním směru, které jsou po dobu 30 minut vystaveny působení destilované vody, čímž se projeví vliv bobtnání.



Obr. 15 Zkušební vzorky dřeva ve swellometru

5.4 METODY STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI BIOLOGICKÝM ČINITELŮM

Přirozenou trvanlivost rostlého dřeva lze odvodit na základě normy ČSN EN 350-2 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi – Přirozená trvanlivost rostlého dřeva – Část2: Přirozená trvanlivost a impregnovatelnost vybraných dřevin důležitých v Evropě [6]. Přirozená trvanlivost dřeva vykazuje poměrně vysokou variabilitu vůči různým druhům biologického napadení (dřevokazným houbám a hmyzu, termitům, mořským škůdcům dřeva atd.), proto je nutné hodnotit trvanlivost jednotlivých dřevin ve vztahu k druhu napadení. V této normě lze nalézt informace o impregnovatelnosti dřevin, která ovlivňuje možnosti ochrany dřevěných prvků.

Na základě aplikace stavebního prvku, vyrobeného z dřeviny spadající do konkrétní třídy trvanlivosti, v určitém prostředí s třídou ohrožení konstrukce je možné posoudit přirozenou trvanlivost daného prvku dle níže uvedené tabulky 3 z ČSN EN 460 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi - Přirozená trvanlivost rostlého dřeva - Požadavky na trvanlivost dřeva pro jeho použití v třídách ohrožení [8].

Tab. 3 Posouzení přirozené trvanlivosti dřevin – návod pro třídy trvanlivosti dřevin a použití v třídách ohrožení [8]

Třída ohrožení	Třída trvanlivosti				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	0	(0)-(x)	(0)-(x)
4	0	(0)	(x)	x	x
5	0	(x)	(x)	x	x
Klíč:					
0	Dostatečná přirozená trvanlivost				
(0)	Přirozená trvanlivost je běžně dostatečná, ale pro určité podmínky používání je možno doporučit ošetření ochranným prostředkem (viz příloha A normy)				
(0)-(x)	Přirozená trvanlivost může být dostatečná, avšak v závislosti na dřevině, její propustnosti a podmínkách používání může být nutné ošetření ochranným prostředkem (viz příloha A normy)				
(x)	Ošetření ochranným prostředkem se obvykle doporučuje, avšak za určitých podmínek používání může být přirozená trvanlivost dostatečná (viz příloha A normy)				
x	Chemická ochrana je nutná				

V případě, že pracujeme s mineralizovaným nebo jinak upraveným dřevem, nelze trvanlivost materiálu odečíst z tabulkových hodnot. Jestliže aplikujeme ošetření na bázi mineralizace dřevní hmoty, je nutné detekovat trvanlivost testováním, zejména při expozici konstrukčních profilů ve vyšších třídách použití. K tomuto účelu jsou prováděny příslušné normové testy ochranných prostředků, sledující degradaci vlivem určitých činitelů. Jsou to např.:

- testy účinku proti povětrnostnímu stárnutí v kontaktu se zemí pomocí metody tzv. L – spoje [76] v souladu s evropskou normou ČSN EN 330 Ochranné prostředky na dřevo – Stanovení relativní účinnosti ochranného prostředku na dřevo pro použití pod nátěry a mimo styk se zemí – Polní zkouška: Metoda L – spoje [3];

- testy odolnosti proti houbám a plísním dřeva (významné pro prvky umístěné v exteriéru nebo vlhkém interiéru) podle několika evropských norem, zahrnujících ČSN EN 113 Ochranné prostředky na dřevo - Zkušební metody na stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes – Stanovení hranice účinnosti [2] a ČSN EN 15457 Nátěrové hmoty – Laboratorní metoda zkoušení účinnosti konzervačních prostředků v nátěru proti působení hub a plísní [11]. Tyto testy byly pro účely práce modifikovány.

5.5 METODY STANOVENÍ MECHANICKÝCH PARAMETRŮ

Pro modifikaci dřeva mineralizací je typická depozice minerálních částic ve struktuře materiálu, přičemž zároveň dochází k částečnému narušení organické matrice. Z tohoto hlediska je velmi pravděpodobné, že bude modifikací docházet kromě změny fyzikálních charakteristik i k změnám mechanických parametrů.

Rostlé dřevo je využíváno jako konstrukční materiál díky svým výborným mechanickým vlastnostem, zejména relativně vysoké pevnosti v tahu za ohybu, a také nízké objemové hmotnosti a dobré opracovatelnosti. Modul pružnosti závisí na objemové hmotnosti, s její zvyšující se hodnotou roste, a klesá s vlhkostí. Hodnoty tlakových, tahových a ohybových modulů pružnosti se téměř neliší (je užívána jedna hodnota), ovšem modul pružnosti stanovený kolmo k vláknům je až 20× nižší než v podélném směru. Při zatěžování dřevěných prvků je kromě způsobu namáhání tedy nutné zohlednit i jejich ortotropní charakter. V normě ČSN EN 338 Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti jsou uvedeny třídy pevnosti dřeva pro stavební konstrukce s hodnotami pevností, modulů pružnosti a hustoty dřeva (objemové hmotnosti), spolu s pravidly pro zařazení do pevnostních tříd, konkrétně pro jehličnaté dřeviny do tříd C14 až C50 a pro listnaté dřeviny D18 až D80 (tab. 4). [5, 27]

Tab. 4 Třídy pevnosti dřeva [5]

	Jehličnaté dřeviny a topol									Listnaté dřeviny					
	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Pevnostní vlastnosti [N·mm⁻²]															
Ohyb	14,0	16,0	18,0	22,0	24,0	27,0	30,0	35,0	40,0	30,0	35,0	40,0	50,0	60,0	70,0
Tah rovnoběžně s vlákny	7,2	8,5	10,0	13,0	14,5	16,5	19,0	22,5	26,0	18,0	21,0	24,0	30,0	36,0	42,0
Tah kolmo na vlákna	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Tlak rovnoběžně s vlákny	16,0	17,0	18,0	20,0	21,0	22,0	24,0	25,0	27,0	24,0	25,0	27,0	30,0	33,0	36,00
Tlak kolmo na vlákna	2,0	2,2	2,2	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	5,3	5,4	5,5	6,2	10,5	12,0
Smyk	3,0	3,2	3,4	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	4,1	4,2	4,5	4,8	5,0
Tuhostní vlastnosti [kN·mm⁻²]															
Průměrný modul pružnosti rovnoběžně s vlákny	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	11,0	12,0	13,0	14,0	17,0	20,0
Průměrný modul pružnosti kolmo k vláknům	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,73	0,80	0,87	0,93	1,13	1,33
Průměrný modul pružnosti ve smyku	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25

V řadě experimentů a zkoušek se stanovuje především pevnost v tlaku dřeva podél vláken, jelikož tento parametr dobře koreluje s dalšími fyzikálně – mechanickými vlastnostmi. Jako příklad lze uvést korelaci mezi průměrným odporem proti vrtání a zmíněnou mechanickou charakteristikou [37]. Pevnost v tlaku dřeva podél vláken se stanovuje na normových tělesech konstrukčního dřeva nebo malých bezvadých tělesech, přičemž v obou případech se tento parametr počítá jako podíl maximální tlakové síly při porušení a plochy radiálního řezu tělesa.

Dále je vhodné pro stavební účely, zejména pro montáž prvků z mineralizovaného dřeva, posoudit také jeho rázovou houževnatost. Podstatou zkoušky houževnatosti je stanovení odolnosti dřeva proti dynamickému (rázovému) namáhání s využitím Charpyho kladiva, které pracuje na principu změny polohové potenciální energie v kinetickou. Při této zkoušce je zjišťována energie potřebná k porušení tělesa ve vztahu k jeho příčným rozměrům.

Zkoušky mechanických vlastností jsou prováděny jak u dřeva rostlého, tak ošetřeného nebo modifikovaného. Porovnáním výsledků mechanických zkoušek před a po provedení příslušné úpravy materiálu je možné posoudit, jakým způsobem jsou zkoumané vlastnosti ovlivněny.

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce obsahuje úvodní charakteristiku materiálů použitých v experimentech, tj. testovaných dřevin (včetně přípravy zkušebních a analytických vzorků), reálných dřevěných konstrukčních profilů odebraných in situ a komerčních chemických prostředků pro mineralizaci dřeva.

Následuje přehled použitých experimentálních a analytických metod, po němž jsou v jednotlivých kapitolách popsány provedené laboratorní analýzy a experimenty a získané dílčí výsledky.

Pro popis mineralizace ve struktuře ošetřeného dřeva je použita kombinace skenovací elektronové mikroskopie a metod termické analýzy, a experiment pro potvrzení vazby mineralizačního roztoku na buněčnou stěnu dřeva založený na hodnocení objemových změn mineralizovaných vzorků.

Pro účely diagnostiky mineralizovaného dřeva in situ bylo na původních konstrukčních profilech provedeno ověření použitelnosti ultrazvukové průchodové metody a metody vrtného odporu. Obdobná měření byla prováděna také na uměle mineralizovaných vzorcích.

Podstatnou část realizovaných experimentálních prací tvoří studium vlhkostního chování mineralizovaného dřeva. Při různých koncentracích mineralizačního roztoku byly provedeny testy objemových změn ve swellometru, hodnocení úhlu smáčení vodou na povrchu hydrofobizovaného dřeva; expozice ošetřeného dřeva v různých třídách použití, a to na starém dřevě bez umělého vysušení, na vzorcích lepeného lamelového dřeva a na vzorcích vybraných dřevin s předchozím umělým vysušením.

V souvislosti s vlhkostním chováním dřeva byla studována také odolnost ošetřeného dřeva proti plísním a dřevokazným houbám.

Závěrečnou skupinu experimentů tvoří testy zaměřené na vliv mineralizace na mechanické vlastnosti ošetřeného dřeva. Testována byla pevnost dřeva v tlaku a jeho rázová houževnatost.

Získaná experimentální data byla zpracována standardními statistickými metodami.

6. MATERIÁLY V EXPERIMENTU

6.1. DŘEVO A VÝROBKY ZE DŘEVA

Pro experimenty byly použity následující typy dřevin:

- jehličnaté:
 - borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.);
 - modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.);
 - smrk ztepilý (*Picea abies* L.);
- listnaté:
 - bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth);
 - buk lesní (*Fagus sylvatica* L.);
 - dub (*Quercus* SPP.) – vzhledem k podobnosti nebylo možné určit druhové jméno dřeviny.

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) je řazena mezi lehké až středně lehké, měkké až středně tvrdé jehličnaté dřeviny s výrazně odlišeným červenohnědým jádrem, které na světle tmavne, od nažloutlé, poměrně široké běle. Dále je pro tuto dřevinu charakteristický výrazný přechod mezi jarním a letním dřevem a makroskopicky dobře viditelné pryskyřičné kanálky v příčných i podélných řezech. Výrazná variabilita vlastností je dána místem výskytu. Pro stavební účely je výhodné zejména dřevo s vyšším obsahem pryskyřic pro konstrukce vystavené střídavě působící vlhkosti (dveřní výplně, konstrukce krovů a stropů) [27, 32].

Modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.) je jehličnatá dřevina, středně lehká a středně tvrdá, s výrazně odlišeným tmavě červenohnědým mohutným jádrem a nažloutlou velmi úzkou bělí. Dále je pro tuto dřevinu charakteristický dobře rozlišitelný přechod mezi jarním a letním dřevem, špatně viditelné pryskyřičné kanálky (zejména na podélných řezech) a málo výrazná vůně. Modřínové dřevo je velice trvanlivé v suchém i vlhkém prostředí, pod vodou je jeho trvanlivost neomezená (vodní, mostní a důlní konstrukce, výplně otvorů a venkovní schody). Zároveň je modřínové dřevo prakticky nehořlavé. Pevností se vyrovná dubovému dřevu, je však levnější [27, 32].

Smrk ztepilý (*Picea abies* L.) patří mezi lehké a měkké jehličnaté dřeviny, bělavé až nažloutlé barvy bez barevně odlišeného jádra. Typickými rysy pro tuto dřevinu jsou makroskopicky špatně rozlišitelné pryskyřičné kanálky, dobře odlišitelné hranice letokruhů s pozvolným přechodem jarní – letní dřevo a výskyt vyvrážděného dřeva (anatomicky obdobné jádru, ale barevně neodlišené se stejnou propustností jako běl). Smrkové dřevo má typickou pryskyřičnou vůni a charakteristický lesk. Z hlediska použití je charakteristická dobrá zpracovatelnost, pružnost a pevnost, trvanlivost v suchém prostředí. Tato dřevina je často užívána na výrobu krovů a stropů [27, 32].

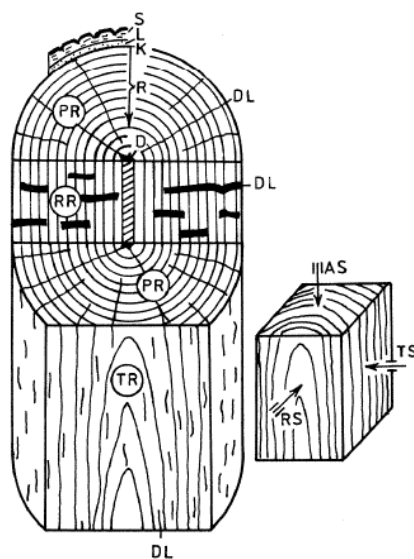
Bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth) patří mezi středně lehké a středně tvrdé listnaté dřeviny bělavé barvy se žlutým až červeným nádechem a neodlišeným jádrem. U této dřeviny se může ovšem vyskytovat i tzv. nepravé jádro, pro nějž je charakteristické tmavší zabarvení, které ovšem nesleduje letokruhy. K dalším typickým rysům náleží nevýrazné rozdíly mezi letním a jarním dřevem, uspořádání málo výrazných cév (tzv. roztroušeně pórovité), makroskopická viditelnost dřeňových paprsků jen na příčných řezech a výskyt

dřeňových skvrn na podélných i příčných řezech. Jako stavební materiál se bříza používá jen výjimečně [27, 32].

Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) je středně lehká, avšak tvrdá listnatá dřevina narůžovělé barvy a bez znatelného jádra, s výskytem vyvrátého dřeva. V případě starších stromů se může vyskytovat i nepravé jádro. Dřevo buku dále charakterizuje výrazná kresba letokruhů, makroskopicky nerozlišitelné roztroušeně pórovité cévy a zřetelné dřeňové paprsky na všech řezech, které často při průchodu letokruhem způsobují jeho zvlnění. Z hlediska stavebního použití je pro dřevo buku důležitá dobrá štípatelnost, pevnost, nízká pružnost, značná sesychavost, v exteriéru malá trvanlivost a naopak zvýšená trvanlivost v interiéru, nebo při ponoření ve vodě. Z těchto důvodů se používá především v nábytkářském průmyslu [27, 32].

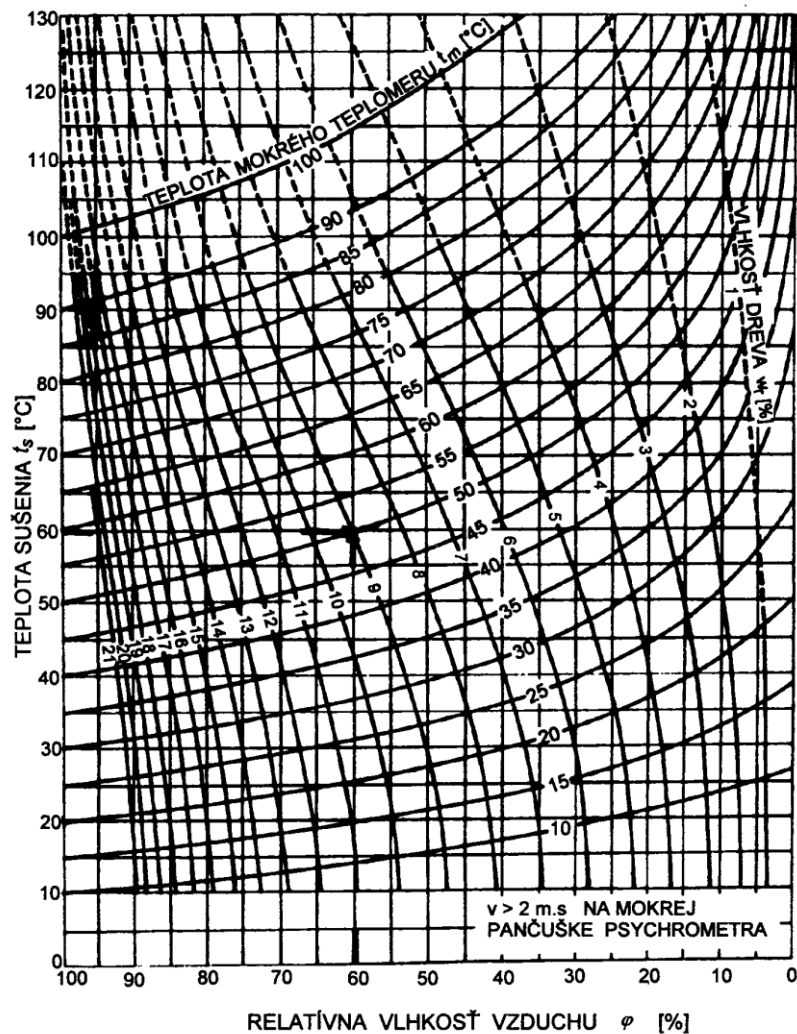
Dub (*Quercus* SPP.) náleží mezi tvrdé a středně lehké dřeviny se světle hnědou úzkou bělí a výrazně odděleným žlutohnědým až tmavě hnědým širokým jádrem. Tuto dřevinu dále charakterizuje výrazná kresba letokruhů, kruhovitě pórovité uspořádání cév, makroskopická viditelnost dřeňových paprsků na všech řezech a typická vůně tříslovin. Při uložení ve vodě nebo v kontaktu s kovovými prvky dochází k zabarvení dřeva. Dubové dřevo je používáno díky své pevnosti, pružnosti, dobré štípatelnosti a vysoké trvanlivosti. Tento druh dřeva je obvykle tím nejkvalitnějším, ovšem také nejdražším materiálem pro výrobu stupnic schodů, truhlářských výrobků, konstrukcí mostů, jezů, základových patek roubených staveb a vysoce namáhaných částí technických zařízení (mlýny, zvonice, apod.) [27, 32].

Z uvedených materiálů byly připraveny zkušební vzorky, jejichž rozměry byly obvykle stanoveny na základě požadavků použitých technických norem, případně požadavků přístrojového vybavení a technických možností měření. Vzhledem k tomu, že dřevo je ortotropní materiál, bylo nutno přesně definovat směr podélných, příčných a tangenciálních řezů (L×R×T) zkušebních těles (obr. 16).



Obr. 16 Řezy a směry v dřevě: příčný řez (PR), radiální řez (RR), tangenciální řez (TR), axiální (podélný) směr (AS), radiální (příčný) směr (RS), tangenciální směr (TS), dřeň (D), letokruhy (R), dřeňový kanálek (DL), kambium (K), lýko (L), kůra (S) [23]

U některých vzorků bylo nutné před jejich přípravou provést umělé, nebo přirozené vysušení, zejména z důvodu zachování jejich rozměrů a rovinnosti před samotným měřením. Uměle vysušené vzorky jsou sušeny obvykle v sušárnách za zvýšené teploty a to tak, aby dosáhly požadované nízké vlhkosti, obvykle pod 12 %. Za přirozeně vysušené dřevo je považováno to, které vysychá na vzduchu, přičemž konečná rovnovážná vlhkost je dána teplotou a vlhkostí prostředí (obr. 17), nejčastěji cca 12 %. V případě, že stanovujeme maximální příjmy dřevin, je vhodnější použití nevysušeného dřeva, u něhož příjem roztoku není ovlivněn strukturálními změnami, vzniklými při vysychání [23, 25, 30].



Obr. 17 Rovnovážná vlhkost dřeva [30]

Kromě výše uvedených dřevin, bylo k přípravě zkušebních vzorků využito také lepené lamelové dřevo – LLD – třídy pevnosti GL32h dle ČSN EN 14080, pro které vyplývají charakteristiky uvedené v tab. 5 [10]. Tyto vzorky byly připraveny z primárních konstrukčních profilů o průřezu 160 × 160 mm a použity pro experimentální posouzení vlivu hydrofobizace při expozici v definovaných třídách použití. Popis rozměrů je pro konkrétní zkušební vzorky uveden v kapitolách týkajících se příslušných experimentů.

Tab. 5 Parametry lepeného lamelové dřeva dle ČSN EN 14080 [10]

	GL20	GL24	GL28	GL32	GL36
Ohyb $f_{m,k}$	20	24	28	32	36
Tah $f_{t,0,k}$	15	18	21	24	27
Tah $f_{t,90,k}$	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45
Tlak $f_{c,0,k}$	21	24	27	29	31
Tlak $f_{c,90,k}$	5,0	5,5	6,0	6,0	6,3
Smyk $f_{v,k}$	2,8	2,8	3,4	3,5	3,5
Modul pružnosti $E_{0,mean}$	10000	11000	12000	13500	14500
Modul pružnosti $E_{0,05}$	8000	8800	9600	10800	11600
Hustota ρ_k	360	380	410	440	480

6.2 CHEMICKÉ LÁTKY PRO MINERALIZACI DŘEVA

Pro mineralizaci dřeva byly použity roztoky organosilanů a křemičitanů. Oba typy látek jsou široce využívány pro impregnaci materiálů v různých průmyslových odvětvích - ve stavebnictví pro ošetření silikátových materiálů, a také při výrobě textilu, papíru a plastů [79].

Lukofob 39 (tab. 6), vyrobený v Lučebních závodech Kolín, je používán jako vodný roztok k hydrofobizaci porézních silikátových stavebních materiálů (omítky, beton, cihly atd.). Jedná se o žlutou až žlutohnědou kapalinu silně alkalické reakce (pH 13), bez zápachu, neomezeně mísitelnou s vodou v poměrech 1:10 až 1:60 pro nátěry, při máčení až 1:100. Naředěný roztok přípravku Lukofob 39 v poměru 1:10 lze též použít pro beztlakovou chemickou injektáž zdíva zvlhčeného vzlínající zemní vlhkostí. Tento roztok je dodáván jako koncentrát, který se ředí vodou. Tento organo-anorganický silanolátový produkt obsahuje 20 % účinné složky, methylsilanolátu draselného ($\text{CH}_3\text{K}_3\text{O}_3\text{Si}$), a 19 % jiných ve vodě nerozpustných složek [71].

Tab. 6 Technické parametry prostředku Lukofob 39 [71]

Technický parametr	Hodnota technického parametru
Barva [-]	Nažloutlá až žlutohnědá, po vyschnutí bezbarvá
Obsah netěkavých složek [hm. %]	36 – 43
Obsah účinné látky [hm. %]	17 – 23
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1270 – 1300
pH [-]	13
Bod tuhnutí [$^{\circ}\text{C}$]	Pod -10
Mísitelnost s vodou [-]	neomezená

Dalším použitým křemičitanem je **vodný roztok křemičitanu sodného Na_2SiO_3 (tzv. vodní sklo)**. Jedná se o kapalinu naředělé až načervenalé barvy, která je ve stavebnictví standardně používána jako pojivo žáruvzdorných malt a tmelů, k výrobě kopolymerů a k dalším účelům. Tento přípravek byl vyroben v Kittfort Praha a obsahuje 36 – 38 % Na_2SiO_3 . Pro účely měření byl tento produkt s pH 11 – 12 použit v neředěné podobě, lze jej však použít taktéž jako vodný roztok [70].

Pro přípravu roztoku kyselého charakteru byl použit **síran měďnatý pentahydrát p.a.**, který je možné použít taktéž pro velmi přesné chemické analýzy z důvodu jeho významné čistoty (tab. 7). Roztok síranu měďnatého pentahydrátu byl použit v ředění 20 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ na 100 ml demineralizované vody. Pro výsledný roztok bylo naměřeno kyselé pH 2,5 [72].

Tab. 7 Technické parametry síranu měďnatého p.a. [72]

Technický parametr	Hodnota technického parametru
Obsah $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [%]	min. 99
Obsah látek nerozpustných v H_2O [%]	max. 0,005
Obsah Cl [%]	max. 0,001
Obsah N – látek [%]	max. 0,001
Obsah Fe [%]	max. 0,003

Pro prvotní výběr vhodného komerčního prostředku bylo testováno více přípravků, které jsou primárně určeny pro ošetření silikátových materiálů. Kromě již zmíněného přípravku Lukofob 39, byly použity tyto ve zkratce popsání produkty [71]:

- lihem ředitelný produkt Lukofob ME, což je methyltriethoxysilan (80 %) s příměsí oligomerních kondenzačních příměsí a etanolu, používaný zejména jako hydroizolační clona proti vztlínání zemní vlhkosti zdiva, hydrofobizátor a zpeňovací látka silikátových materiálů apod.;
- vodou ředitelný produkt Lukofob EVO s účinnou složkou na bázi monomerního alkylsiloxanového esteru (50 %) bez přídavku organických rozpouštědel, který je využíván jako hydrofobizátor silikátových materiálů i čerstvého betonu (odolný vůči alkalickému prostředí).

6.3 PŮVODNÍ KONSTRUKČNÍ PROFILY

Kromě výše uvedených materiálů a látek bylo pro dva experimenty použito i původních konstrukčních profilů.

První skupina vzorků bez předpokládané mineralizace byla odebrána pro simulaci sanačního zásahu na stávající konstrukci pomocí mineralizačního ošetření. Tyto vzorky pocházejí z výřezů realizovaných na konstrukčním profilu ze smrkového dřeva (*Picea abies* L.), tesaného, uměle nevysušeného, odebraného při rekonstrukci krovu hospodářského objektu, cca 60 let starého. Prvek byl situován v zakrytém, nevytápěném prostoru, třídy použití 2 - 3 dle ČSN EN 335 [4]. Na konstrukčním prvku ani v konstrukci nebyly při odběru vzorku identifikovány žádné viditelné stopy biologického napadení, ovšem infekce trhlín a neodkorněných částí byla předpokládána.

Druhá skupina vzorků (obr. 18), u které lze předpokládat alespoň částečnou povrchovou mineralizaci, byla odebrána pro diagnostiku mineralizace pomocí ultrazvuku a Resistographu. Tyto silně degradované vzorky pocházejí z konstrukčních profilů především stropních konstrukcí zámku v Petřvaldě, u kterých bylo možné předpokládat i jistý obsah minerálních částic – umístění v kontaktu s minerálními látkami (zásypy stropů, aplikace jílových mazanin apod.). Zmíněné prvky byly vyrobeny z jehličnatých dřevin, zejména smrku ztepilého (*Picea abies* L.), jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.), ojediněle i modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), a byly opět situovány v zakrytém, nevytápěném prostoru, třídy použití 2

až 3 dle ČSN EN 335 v řádech stovek let [4]. U těchto prvků se vyskytovaly různé formy lokální i celkové degradace fyzikálními i biologickými činiteli, trhliny apod.



a)

b)

Obr. 18 Příklad testovaných vzorků původních konstrukčních profilů: a) degradovaný stropní trám, b) prvek s vysušnými trhlinami

Ke zcela specifickým vzorkům, použitým v praktické části práce, náleží části výdřev, odebraných v Poštovní a Modré štolě ve Zlatých horách (obr. 19). Tyto vzorky nejsou typickými stavebními prvky, ale vzhledem ke zřetelnému výskytu alofánu (hydratovaného křemičitanu hlinitého v amorfní formě) na jejich povrchu i povrchu štol, je lze pokládat za typické zástupce mineralizovaného dřeva. Z hlediska konstrukčního jsou výdřevy složeny z odkorněných kulatin s průměrem cca 5 – 15 cm, hranolů, latí atd., vyrobených pravděpodobně z jehličnatých dřevin. Jelikož depozice alofánu byly poměrně významné, nebylo možné určit původní dřevinu. Vzhledem k poměrně omezené možnosti odběru byly odebrané vzorky použity pouze pro stanovení hmotnosti a koncentrace minerálního podílu pomocí termické analýzy.



Obr. 19 Depozice alofánů na důlních stěnách a prvcích výdřev – Modrá štola, Zlaté hory

7. POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ A ANALYTICKÉ METODY

V rámci praktické části byl použit komplex zkušebních a experimentálních metod, které zkoumaly použité látky a mineralizované vzorky z různých hledisek. Konkrétně byly použity následující analytické a experimentální metody:

- metody popisu mineralizace:
 - skenovací elektronová mikroskopie;
 - termická analýza;
 - test navázání minerální složky na buněčnou stěnu;
- diagnostické in situ metody dřevěných konstrukcí:
 - ultrazvuková průchodová metoda;
 - metoda odporového vrtání;
- metody popisu vlhkostního chování mineralizovaného dřeva:
 - výběr vhodného hydrofobizátoru testem ve swellometru;
 - testování účinnosti proti bobtnání vybraného hydrofobizačního přípravku ve swellometru;
 - aplikace jiných experimentálních metod (stanovení smáčecího úhlu, sledování vlhkostního chování v různých expozičních podmínkách apod.);
- metody stanovení odolnosti proti biologickým činitelům:
 - metoda stanovení odolnosti proti vybraným dřevokazným houbám;
 - metoda stanovení odolnosti proti vybraným plísním;
- metody stanovení mechanických parametrů:
 - metoda stanovení pevnosti v tlaku malých bezvadých vzorků podél vláken;
 - metoda stanovení rázové houževnatosti.

Postupy a výsledky jednotlivých metod spolu s dosaženými dílčími výsledky jsou popsány v následujících kapitolách.

8. POPIS MINERALIZACE DŘEVA

Stupeň mineralizace, tj. množství minerální složky a hloubka, do které minerály pronikají, byl studován kombinací následujících analytických metod: skenovací elektronové mikroskopie (SEM) a termické analýzy (DSC, TG), a jednoho navrženého experimentálního postupu.

8.1 APLIKACE SKENOVACÍ ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE

U jednotlivých vzorků uměle mineralizovaného dřeva bylo hodnoceno rozložení minerálních částic a stav dřevěné matrice.

8.1.1 POSTUP ZKOUŠKY

Pro experiment byly použity vzorky o rozměrech 300 × 125 × 125 mm (L×R×T), připravené ze dřeva smrku ztepilého (*Picea abies* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Quercus* SPP.) (viz kapitola 6.1). Vzorky nebyly před experimentem vysušeny, aby příjem roztoku nebyl ovlivněn strukturními změnami vzniklými při vysychání. Pro každý vzorek byla před máčením stanovena hmotnost m_0 s přesností na 0,1 g a vlhkost dřeva w_0 byla stanovena hrotovým odporovým vlhkoměrem s přesností na 0,1 %.

K ošetření vzorků byly použity tři typy chemických prostředků, jejichž detailní popis je uveden v kapitole 6.2:

- Lukofob 39 ve formě vodného roztoku s hmotnostní koncentrací 50 %;
- neředěný roztok vodní skla (Na_2SiO_3);
- vodný roztok síranu měďnatého pentahydrátu (modré skalice) v ředění 20 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ na 100 ml demineralizované vody.

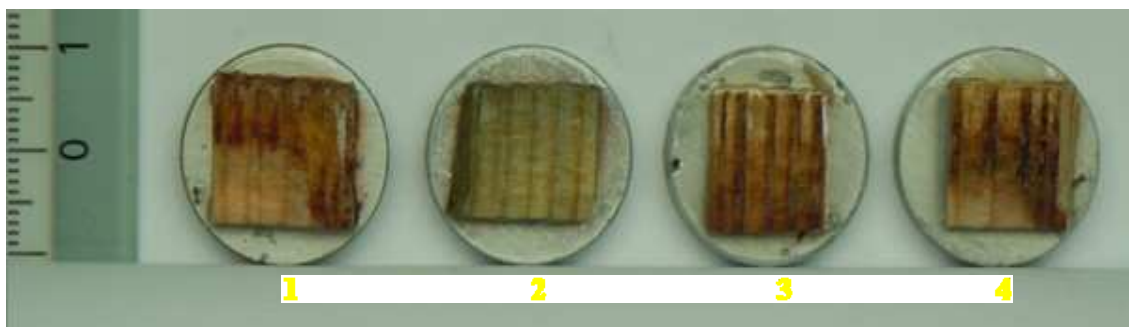
Vzorky dřeva byly nejprve ošetřeny ponořením do uvedených roztoků za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa, teploty 20 ± 1 °C, a doby máčení 4 a 8 hodin, 1, 3, 7, 14, a 28 dnů. Po vyjmutí vzorku z roztoku byly vzorky osušeny filtračním papírem tak, aby dále nedocházelo k pronikání roztoku do materiálu. U těchto vzorků byla následně zaznamenána hmotnost m_1 s přesností na 0,1 g. Pro jednotlivé doby máčení byly vypočteny změny hmotnosti Δm [%] podle vztahu:

$$\Delta m = 100 \times \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad [\%] \quad (2)$$

Poté byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí s teplotou 20 ± 1 °C dokud nedosáhly rovnovážné vlhkosti.

Z každého takto ošetřeného primárního vzorku byl připraven preparát pro mikroskopickou analýzu radiálního řezu. Preparát byl zhotoven takovým způsobem, aby se na jeho hranách nacházely oba dva povrchy penetrace v axiálním a radiálním směru. Nejprve byla radiální plocha vytvořena štípáním a poté byly tyto preparáty fixovány s použitím PVAC lepidla na hliníkové terče (obr. 20). Následně byla po fixaci preparátu odebrána pomocí žiletky tenká vrstvička pro vytvoření ideálního radiálního řezu. Dále byl na druhé čelní hraně preparátu vytvořen šikmý řez pro přesnější orientaci mezi jarním a letním

dřevem. Finálně byl preparát pokoven zlatem ve vysokém vakuu pomocí napařovacího zařízení.



Obr. 20 Preparáty modřínu opadavého pro SEM ošetřené 1 – roztokem vodního skla (Na_2SiO_3) po 28 dnech, 2 – roztokem modré skalice ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po 28 dnech, 3 – roztokem přípravku Lukofob 39 po 1 dnu, 4 – roztokem přípravku Lukofob 39 po 28 dnech

Mikroskopické analýzy byly provedeny na Technické univerzitě ve Zvoleně, Drevárské fakultě, s pomocí skenovacího elektronového mikroskopu VEGA TS Tescan 5130 (tab. 8) při urychlovacím napětí 16,7kV, přičemž byly na získaném signálu využívány sekundární elektrony (SE detektor). Na jednotlivých snímcích byly detekovány významné kvalitativní změny ve struktuře xylému a v případě jejich nálezu byla určena jejich vzdálenost od povrchu penetrace v axiálním nebo radiálním směru.

Tab. 8 Vybrané technické parametry přístroje VEGA TS Tescan 5130 [69]

Parametr	Hodnoty přístroje
Rozlišení	3 nm
Zobrazovací módy optického systému	Resolution, Depth, Field, Fish - eye, Rocking – beam
Min. zvětšení v módu Fish Eye	přibližně 4×
Urychlovací napětí	200 V až 30 kV
Elektronová tryska	Wolframová žhavená katoda
Proud ve stopě	1 pA až 2 μA
Rastrovací rychlost	Od 600 ns do 10 ms na pixel, nastavitelná po krocích nebo plynule
Fokusační okno	Tvar, velikost a poloha plynule nastavitelná
Velikost obrazu	Až do 4 096 × 4 096 pixelů, volitelně čtverec nebo obdélník 3:4

8.1.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Změny hmotnosti Δm v průběhu máčení byly vyjádřeny ve vztahu k počáteční hmotnosti vzorku před jeho mineralizováním (tab. 9). Bylo zjištěno, že se po určité době objevily ztráty hmotnosti u všech vzorků ošetřených přípravkem Lukofob 39, u dubu a buku ve vodním skle a u dubu v roztoku $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Tento efekt byl pravděpodobně způsoben rozkladem a následným vyluhováním jednotlivých chemických složek dřeva. Z tohoto důvodu nebylo možné u těchto vzorků vypočítat příjem roztoku.

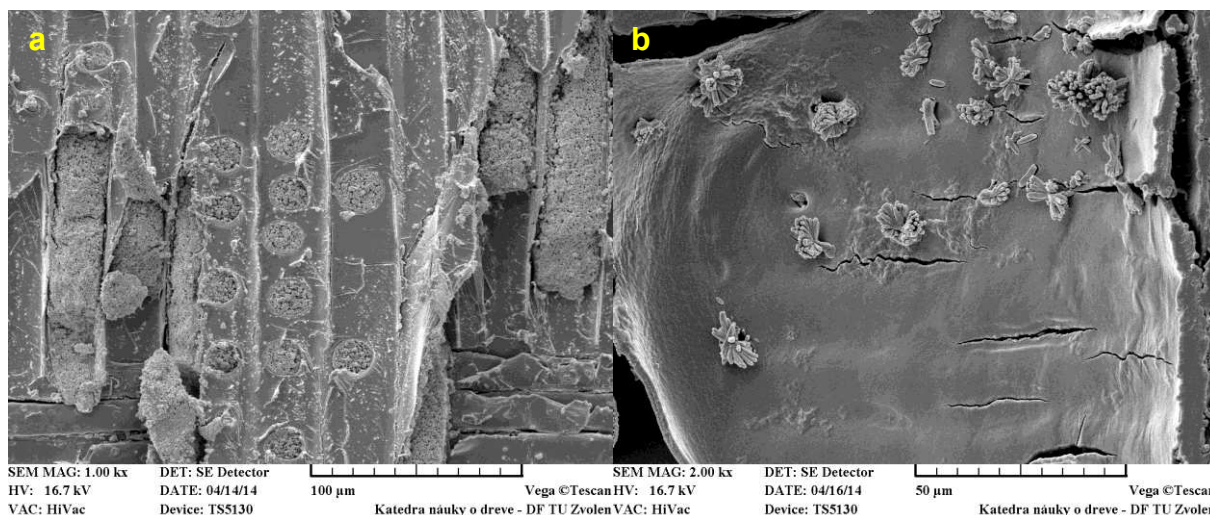
Tab. 9 Změny hmotnosti během máčení vzorku v roztoku přípravku Lukofob 39, Na_2SiO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro SEM

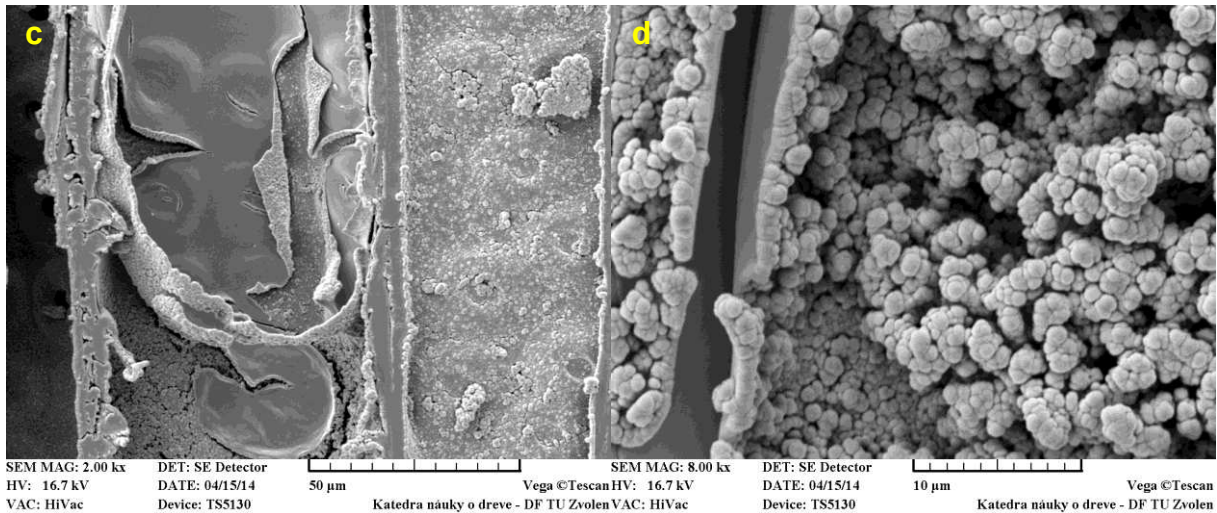
		t [dny]	1/6	1/3	1	3	7	14	28
Roztok Lukofob 39	Buk lesní		4,87 %	5,78 %	8,17 %	8,98 %	9,27 %	10,28 %	3,78 %
	Dub		1,41 %	1,96 %	2,80 %	3,92 %	4,11 %	3,57 %	-0,07 %
	Modřín opadavý		2,15 %	2,69 %	3,74 %	6,22 %	8,32 %	12,84 %	11,51 %
	Smrk ztepilý		3,82 %	4,78 %	7,42 %	13,45 %	22,42 %	25,82 %	17,70 %
Roztok Na_2SiO_3	Buk lesní		6,76 %	8,56 %	10,05 %	10,51 %	11,47 %	11,19 %	11,16 %
	Dub		1,12 %	1,47 %	1,63 %	1,76 %	1,26 %	-0,16 %	-0,58 %
	Modřín opadavý		2,43 %	2,20 %	2,94 %	3,73 %	4,03 %	4,10 %	8,56 %
	Smrk ztepilý		4,66 %	5,34 %	6,19 %	7,12 %	7,70 %	9,44 %	10,45 %
Roztok $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Buk lesní		1,77 %	2,58 %	6,94 %	9,06 %	10,37 %	12,39 %	19,95 %
	Dub		1,16 %	1,31 %	1,95 %	3,35 %	5,02 %	7,46 %	5,74 %
	Modřín opadavý		1,97 %	2,18 %	3,33 %	5,37 %	8,02 %	10,48 %	15,26 %
	Smrk ztepilý		3,85 %	4,42 %	5,87 %	6,98 %	8,23 %	9,30 %	11,91 %

Pozn.: Červeně označené hodnoty odpovídají délkám máčení testovaným pomocí SEM.

Vzorky ošetřené organosilanem Lukofob 39

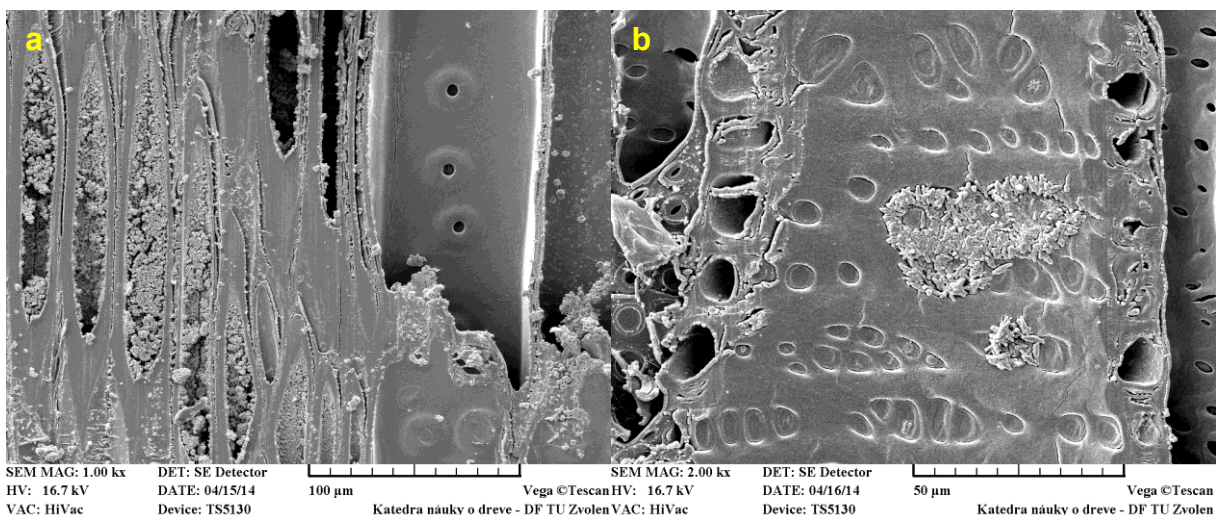
Jemné, nebo různě granulované (obr. 21d), křehké a lokálně odlupující se minerální povlaky se nacházely ve strukturních jednotkách povrchových vrstev jednotlivých vzorků dřeva ošetřených organosilanem již po 24 hodinách. Tyto strukturní prvky lokálně i zcela vyplňují lumény. Penetrace je nerovnoměrná. Tečky a ztenčiny jsou obvykle vyplněny minerálními částicemi (obr. 21a). U jehličnatých dřevin jsou vyplněny tracheidy jarního i letního dřeva a radiální parenchym. U listnatých dřevin jsou vyplněny cévy jarního i letního dřeva, parenchym dřeňových paprsků i axiální parenchym, ale penetrace je blokována thylami cév (obr. 21b). Křehký film vzniká i na sekundární buněčné stěně S_3 modřínu (obr. 21c), dubu i buku. V lumenech modřínových tracheid jsou patrné vzduchové embolie, které dokumentují hloubku penetrace. U modřínu lze nalézt granulovité útvary podobné minerálním novotvarům, které však nejsou minerálního původu (jsou tvořeny ligninem). U dubu se vyskytují zborcené tenkostěnné bublinky roztoku, které indikují hranici penetrace roztoku.

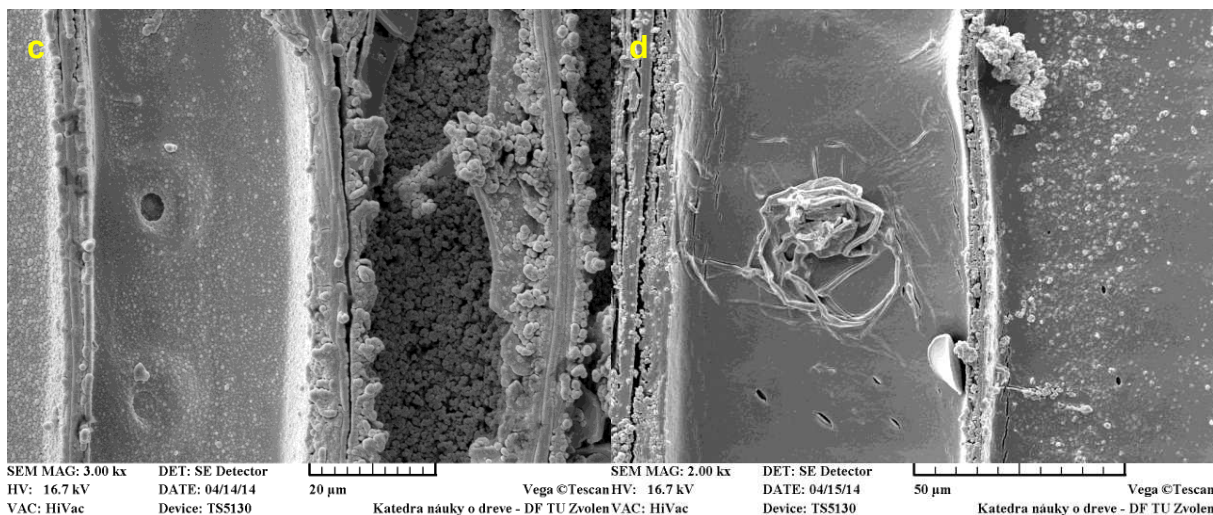




Obr. 21 Vzorky ošetřené organosilanem (Lukofob 39) po 24 hodinách: a) inkrustované tečky a vytváření ucpávek v lumenech tracheid v hloubce 2,5 mm v radiálním směru od povrchu smrkového vzorku; b) jehličkovité silanolátové struktury v perforacích na vnitřním povrchu thyl cév jarního dřeva u povrchu dubových vzorků; c) penetrace silanolátu pod sekundární vrstvu S_3 jarní tracheidy modřinu; d) detail silanolátových struktur

Po 28 dnech jsou téměř celé preparáty nasyceny organosilanem. Granulovité nebo hladké křehké povlaky jsou více rozšířené a mohou se odlupovat. Vrstvy usazenin v lumenech dosahují lokálně značných tloušťek nebo zcela vyplňují jednotlivé strukturální prvky. U jehličnanů jsou vyplněny tracheidy jarního i letního dřeva (obr. 22a) a radiální parenchym. U listnatých dřevin jsou vyplněny cévy jarního i letního dřeva (obr. 22b) a parenchym dřevňového paprsku i axiální, ovšem penetrace je částečně nebo úplně blokována thylami v cévách. Opět vzniká křehký film i na sekundární buněčné stěně S_3 , tentokrát u všech druhů dřevin, ale u smrku je zřetelná penetrace mezi vrstvy sekundární buněčné stěny (obr. 22c). Tečky a ztenčení jsou obvykle vyplněny. Zdokumentován je také výskyt zborcených tenkostěnných bublinek u smrku a modřinu (obr. 22d). Vzduchové embolie lze nalézt v minerálních povlacích buku.

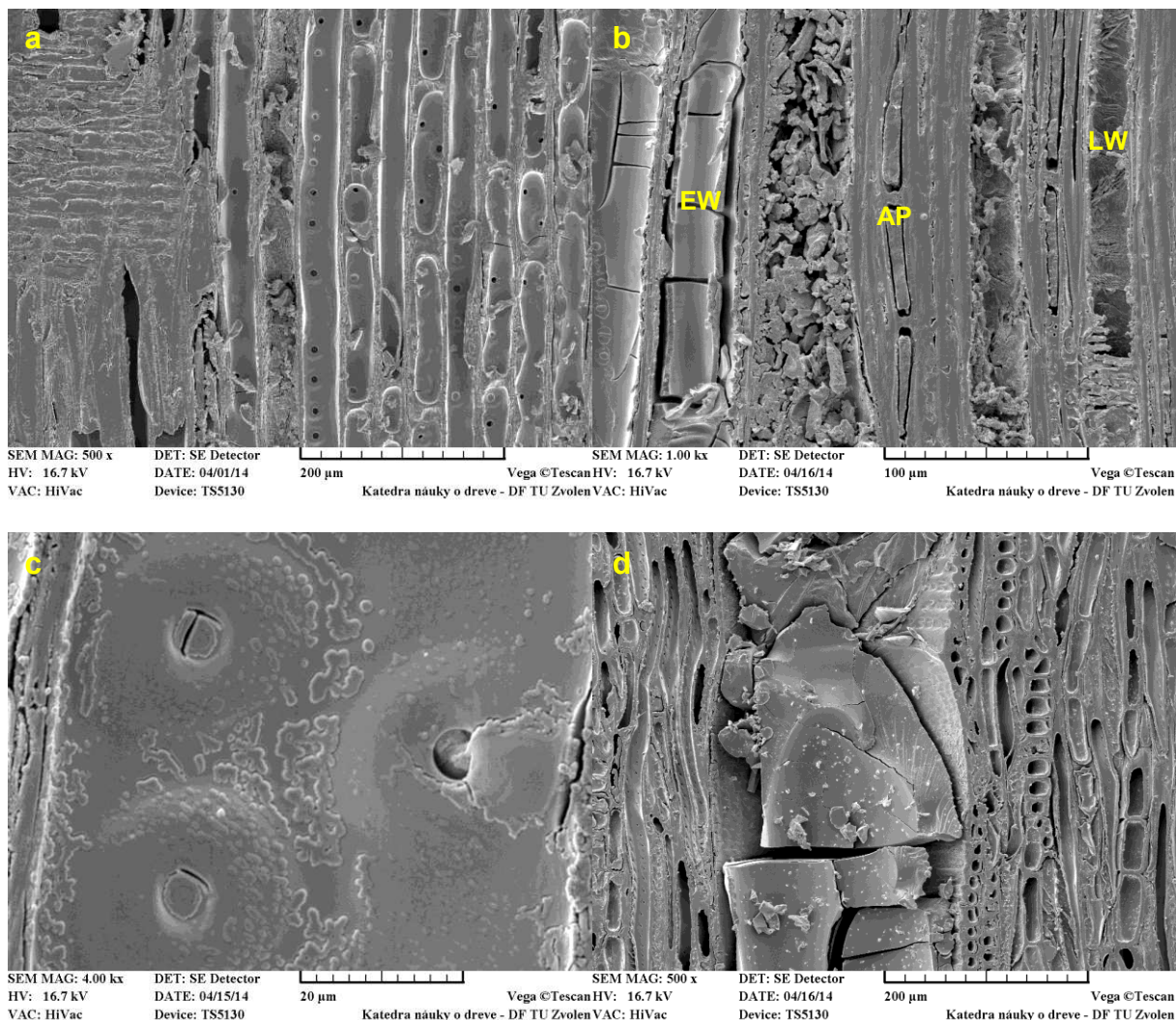




Obr. 22 Vzorky ošetřené organosilanem (Lukofob 39) po 28 dnech: a) lumeny letních tracheid silně blokovány minerálními usazeninami u modřínového vzorku; b) penetrace struktur silanolátu přes ztenčeniny v jarní cévě dubu; c) povrch lumenů (sekundární buněčná stěna S₃) – struktury silanolátu penetrují mezi vrstvy sekundární buněčné stěny, což je patrné na řezu smrkovou buněčnou stěnou, tečky jsou vyplněny minerálními novotvary a vpravo na snímku je lumen tracheidy silně blokován minerálními usazeninami; d) zborcená tenkostěnná bublinka penetrujícího roztoku na tečce tracheidy jarního dřeva s vypadlým torusem u modřínového vzorku

Vzorky ošetřené roztokem vodního skla (Na₂SiO₃)

Vzorky dřeva máčené v roztoku Na₂SiO₃ po dobu 28 dnů mají jednotlivé strukturální elementy nerovnoměrně vyplněny minerálními útvary (obr. 23b), nebo hladkým, či granulovitým křehkým povlakem (obr. 23d), u listnatých dřevin šupinovitým až jehličkovitým. Povlak s nesterjnoměrnou tloušťkou vzniká také na sekundární buněčné stěně S₃ u modřínu a smrku. Roztok penetruje dřevem přes tečky a ztenčeniny, které poté inkrustuje (obr. 23c). Thyly opět tvoří bariéru při penetraci roztoku. U jehličnatých dřevin roztok penetruje především do tracheid jarního, ale i letního dřeva a parenchymu dřeňového paprsku. U listnáčů jsou povlakem pokryty především cévy jarního dřeva, ale i letního dřeva, dále také parenchym axiální a dřeňového paprsku. Vzduchové embolie se objevují u povlaků smrku, modřínu a buku (obr. 23a). Minerální novotvary se objevují u obou jehličnanů i na opačné straně preparátu, která nebyla v přímém kontaktu s roztokem. V letních cévách buku lze nalézt typické žebříčkovité perforace s bradavičnatou vrstvou (tzv. warty layer), která nesmí být zaměněna s minerálními útvary vodního skla.

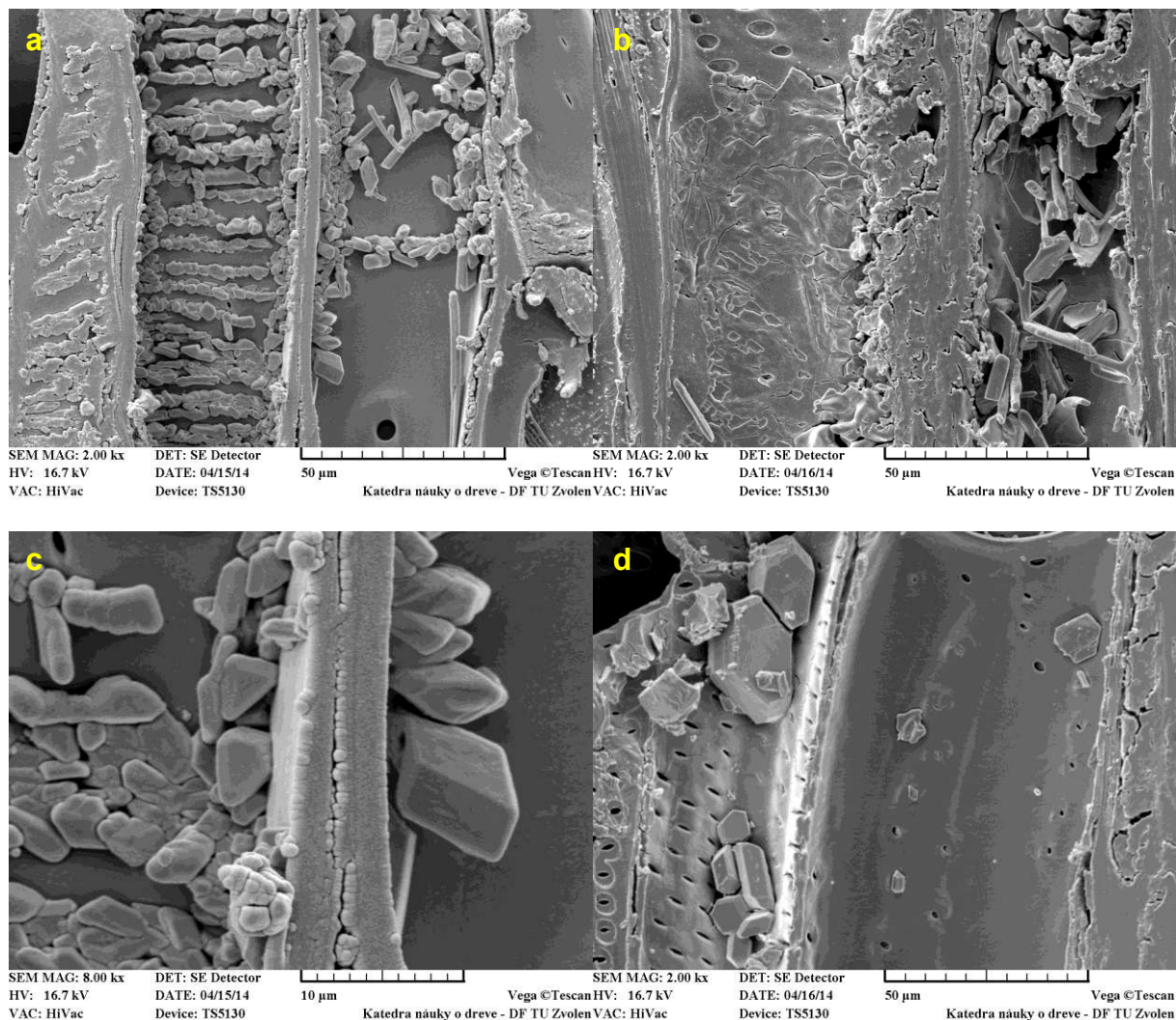


Obr. 23 Vzorky ošetřené vodním sklem po 28 dnech: a) detail vzduchových embolií v tracheidách jarního smrkového dřeva; b) detail strukturovaného povlaku v lumenech cév letního dřeva (LW) versus odlupování a vznik křehkých trhlin v hladkém povlaku vodního skla v cévách jarního dřeva (EW) a inkrustace axiálního parenchymu (AP) vzorku bukového dřeva; c) penetrace vodního skla torusem dvojtečky modřínu; d) křehké lomy povlaku vodního skla v jarní cévě dubu

Vzorky ošetřené roztokem síranu měďnatého pentahydrátu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

U vzorků ošetřených roztokem $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ se po 28 dnech nerovnoměrně objevují krystaly (obr. 24c a 24d), shluky krystalů i krátké usazeniny. Plné vyplnění strukturálních elementů je raritní (obr. 24b). U jehličnatých dřevin roztok penetruje do tracheid jarního dřeva, lokálně i letního dřeva, u modřínu i do parenchymu dřeňových paprsků. U tracheid jarního modřínového dřeva se lokálně vyskytuje horizontální liniová reorganizace krystalů (obr. 24a). U listnatých dřevin roztok penetruje do cév jarního i letního dřeva, u buku také do axiálního parenchymu. Thylly tvoří bariéru pro další penetraci. Modřínová a dubová sekundární buněčná stěna S_3 je lokálně pokryta usazeninami. Usazeniny jsou také v tečkách a ztenčeninách. Vzduchové embolie jsou patrné u povlaků modřínu. U smrkových vzorků

byly nalezeny také hyfy, s nimiž může být spojen výskyt metabolitů – krátkých šikmých usazenin a jejich shluků, které mohou být zaměněny za krystaly $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.



Obr. 24 Vzorky ošetřené roztokem $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ po 28 dnech: a) liniová horizontální reorganizace krystalů v lumenech tracheid jarního modřínového dřeva; b) vznik krystalů i strukturovaného šupinkovitého povlaku v cévách jarního bukového dřeva v hloubce 1333 μm v radiálním směru od povrchu vzorku; c) detail krystalů pentahydrátu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) v tracheidách modřínu; d) triklinický krystalický systém pentahydrátu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) v jarních cévách buku v hloubce 1540 μm v radiálním směru od povrchu vzorku

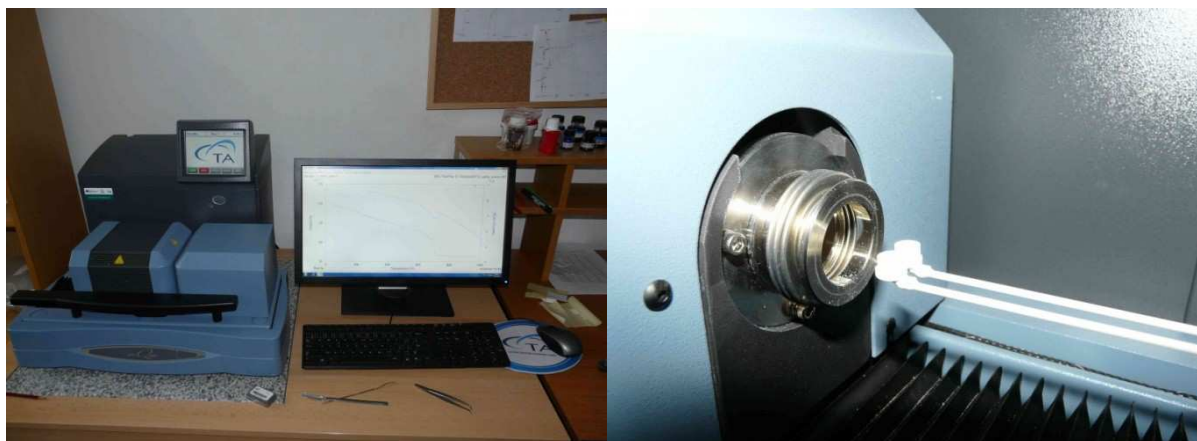
8.2 APLIKACE TERMICKÉ ANALÝZY

Vzorky ošetřené minerálními látkami byly vystaveny působení tepelného zatížení s konstantní rychlostí ohřevu (tzv. rampou). Především byla řešena hmotnost popela po provedení zkoušky v inertní atmosféře a posuny jednotlivých reakcí na záznamu TG/DSC křivek.

8.2.1 POSTUP ZKOUŠKY

Charakteristické změny při teplotním zatěžování zkoumaných vzorků byly hodnoceny pomocí termické analýzy (v Laboratoři tepelných vlastností, reologie a koroze stavebních

materiálů na FAST, VŠB – TUO). Pro tyto účely je využíván přístroj SDT Q600, TA Instruments (obr. 25), který umožňuje simultánní kombinaci termogravimetrické analýzy a diferenční skenovací kalorimetrie (TG/DSC) [74].



a) b)
Obr. 25 Termický analyzátor: a – přístroj SDT Q600, b – systém horizontálních vah

Měření poklesu hmotnosti a změny tepelného toku lze provádět na tomto přístroji až do teploty 1500 °C [74], které je dosaženo v okolí vzorku pomocí předem definovaného teplotního průběhu. V závislosti na použitém plynu lze také zvolit atmosféru výpalu [74]:

- oxidační – vzduch;
- redukční – dusík.

Přístroj je vybaven systémem horizontálních vah s dvěma vahadly, na něž je do korundových (do 1500 °C s objemem 90 μL), nebo platinových kelímků (do 1000 °C s objemem 110 μL) umístěn zkoušený a referenční vzorek [74]. Směr proudění plynu přes pec termického analyzátoru je taktéž horizontální, čímž jsou účinně odstraňovány produkty rozkladu z oblasti vzorků.

Příprava primárních vzorků probíhala obdobným způsobem jako v případě analýzy SEM. Pro experiment byly použity nevysušené vzorky s rozměry 300 × 125 × 125 mm (L×R×T) ze smrku ztepilého (*Picea abies* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Quercus* SPP.) (viz kapitola 6.1), u nichž byla stanovena hmotnost m_0 s přesností na 0,1 g a vlhkost w_0 hrotovým odporovým vlhkoměrem s přesností na 0,1 %. K ošetření byly opět použity tři typy chemických prostředků, jejichž detailní popis je uveden v kapitole 6.2:

- Lukofob 39 ve formě vodného roztoku s hmotnostní koncentrací 50 %;
- neředěný roztok vodního skla (Na_2SiO_3);
- vodný roztok síranu měďnatého pentahydrátu (modré skalice) v ředění 20 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ na 100 ml demineralizované vody.

Vzorky dřeva byly nejprve ošetřeny ponořením do uvedených roztoků za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa, teploty 20 ± 1 °C, a doby máčení 4 a 8 hodin, 1, 3, 7, 14, a 28 dnů. Po vyjmutí z roztoku byly vzorky osušeny filtračním papírem tak, aby dále nedocházelo k pronikání roztoku do materiálu. U těchto vzorků byla následně zaznamenána

hmotnost m_1 s přesností na 0,1 g. Pro jednotlivé doby máčení byly vypočteny změny hmotnosti Δm v [%] podle vztahu (2).

Poté byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí s teplotou 20 ± 1 °C dokud nedosáhly rovnovážné vlhkosti. V tomto prostředí byly ponechány také vzorky referenční – bez minerálního ošetření. Odběr vzorku pro sledování množství minerální látky v celém průřezu vzorku byl následně proveden pomocí přírůstkového vrtáku (obr. 26a). Tento nástroj umožňuje odběr válcového tělesa s průměrem cca 5 mm a délkou rovnající se příčnému rozměru primárního vzorku (obr. 26b).



a) b)
Obr. 26 Přírůstkový vrták: a – realizace odběru vzorku, b – odebrané vzorky

Pro účely termické analýzy byly z válcových tělísek následně směrem od povrchu ke středu vždy ze dvou protilehlých stran vzorku (značení válcových vzorku acv, nebo amo) skalpelem odřezávány válcové řezy s průměrem cca 5 mm a výškou 1 – 2 mm. Výška řezu byla změřena posuvným měřidlem s přesností na 0,01 mm. Hmotnost vzorku byla určena pomocí integrovaných přesných vah termického analyzátoru s přesností na 0,001 mg. Tyto vzorky byly následně umístěny do korundových misek a tepelně zatěžovány s konstantní rychlostí ohřevu 10 °C·min⁻¹ do 900 °C v redukční atmosféře N₂. Redukční atmosféra byla zvolena proto, že během tepelného zatížení nedochází k oxidačnímu spalování, ale k pyrolýze. Během této reakce se organické látky plně nerozkládají, čímž je výsledná zřetelnost jednotlivých reakcí na vykreslených křivkách výrazně lepší.

Kromě vzorků ošetřených mineralizační látkou byly pro účely termické analýzy odebrány přírůstkovým vrtákem také vzorky referenční. Tento materiál má stejný původ jako primární vzorky, u nichž byla provedena simulace mineralizace máčením pro termickou analýzu, SEM (viz kapitola 8.1) atd. U jednotlivých dřevin byly opět odebrány vzorky přírůstkovým vrtákem a z nich byla skalpelem odkrajována válcová tělesa s různou výškou, nejčastěji v rozmezí 1 – 2 mm, která byla změřena s přesností na 0,01 mm a zvážena s přesností na 0,001 mg.

Při vyhodnocení výsledků byla primárně sledována hmotnost popela různě ošetřených vzorků mineralizovaného dřeva a referenčních vzorků, a tyto údaje byly doplněny o hodnocení průběhu TG/DSC křivky. Nejprve byly hodnoceny vzorky referenčních dřevin

a to na základě odvozených vztahů. Hlavní charakteristikou, odečítanou z TG křivek byl spalitelný podíl Δ_{sp} [%]. Na základě jednoduchého vzorce byl dopočten nespalitelný podíl Δ_{nesp} [%] dle vztahu:

$$\Delta_{nesp} = 100 - \Delta_{sp} \quad [\%] \quad (3)$$

Na základě znalosti původní hmotnosti m_0 [mg] a procentuálního podílu nespalitelné části Δ_{nesp} [%] lze dopočíst hmotnost nespalitelného podílu m_{nesp} [mg] dle vztahu:

$$m_{nesp} = 0,01 \cdot \Delta_{nesp} \cdot m_0 \quad [\text{mg}] \quad (4)$$

Respektive lze dopočítat i koncentraci nespalitelné složky na 1 m³ dřeva c_{nesp} [kg·m⁻³] při znalosti výšky tělesa l [mm] a průměru tělesa $d = 5$ mm dle vztahu:

$$c_{nesp} = \frac{m_{nesp}}{V} = \frac{4 \cdot m_{nesp}}{\pi \cdot l \cdot d^2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (5)$$

Po vyhodnocení referencí je teprve možné přistoupit k hodnocení samotného mineralizovaného dřeva. Aplikace obdobných odvozených vztahů, jako v případě referenčních vzorků, může poskytovat potřebné veličiny pro popis zastoupení minerálních částic v popelu, a následně tedy v dřevěné matici. Konkrétně je možné vypočítat podíl minerálních částic obsažených v popelu Δ_{min} [%] jako rozdíl zjištěného nespalitelného podílu Δ_{nesp} [%] a průměrného nespalitelného podílu referenční dřeviny $\overline{\Delta_{nesp,ref}}$ [%] dle vztahu:

$$\Delta_{min} = \Delta_{nesp} - \overline{\Delta_{nesp,ref}} \quad [\%] \quad (6)$$

Obdobně jako ve vztahu (4) lze dopočíst hmotnost minerálního podílu v popelu m_{min} [mg] dle vztahu (7), kde m_0 [mg] je hmotnost vzorku před provedením termické analýzy:

$$m_{min} = 0,01 \cdot \Delta_{min} \cdot m_0 \quad [\text{mg}] \quad (7)$$

Respektive lze obdobně jako ve vztahu (5) dopočítat také koncentraci nespalitelné minerální složky na 1 m³ dřeva c_{min} v [kg·m⁻³] dle vztahu:

$$c_{min} = \frac{m_{min}}{V} = \frac{4 \cdot m_{min}}{\pi \cdot l \cdot d^2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (8)$$

8.2.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Nejprve byly vyhodnoceny referenční vzorky všech použitých dřevin. Celkově bylo provedeno 30 měření, konkrétně 7 – 8 z každé dřeviny, přičemž menší počet měření bylo možné použít pro listnaté dřeviny, které vykazují podstatně menší odchylky vlastností. Pro každý vzorek byly z procentuálního úbytku hmotnosti vypočteny hodnoty hustoty dřeva ρ , spalitelného Δ_{sp} i nespalitelného podílu Δ_{nesp} , hmotnost nespalitelného podílu m_{nesp} a koncentrace nespalitelné složky c_{nesp} (tab. 10). V případě vzorku č. 6 z referenční dřeviny modřínu opadavého se potvrdilo, že charakter provedeného řezu významně ovlivňuje výsledek zkoušky. V tomto případě byl použit vzorek, vykazující značné třepení povrchu, což se negativně projevilo téměř na všech zjištěných parametrech (viz červeně vyznačené hodnoty v tab. 10).

Tab. 10 Vypočtené charakteristiky hustoty dřeva ρ , spalitelného podílu Δ_{sp} , nespalitelného podílu Δ_{nosp} , hmotnosti nespalitelného podílu m_{nosp} a koncentrace nespalitelné složky c_{nosp} u referenčních vzorků dřeva

a) buk lesní

	l [mm]	m_0 [mg]	ρ [kg·m ⁻³]	Δ_{sp} [%]	Δ_{nosp} [%]	m_{nosp} [mg]	c_{nosp} [kg·m ⁻³]
1	1,58	19,701	635	82,08	17,92	3,53	51,73
2	1,26	11,345	459	80,68	19,32	2,19	40,27
3	1,57	23,964	777	80,63	19,37	4,64	68,44
4	1,28	18,416	733	81,60	18,40	3,39	61,28
5	1,22	17,013	710	81,08	18,92	3,22	61,08
6	0,87	12,332	722	82,50	17,50	2,16	57,42
7	1,16	15,664	688	82,56	17,44	2,73	54,52
\bar{x}				81,59	18,41		56,39

b) dub

	l [mm]	m_0 [mg]	ρ [kg·m ⁻³]	Δ_{sp} [%]	Δ_{nosp} [%]	m_{nosp} [mg]	c_{nosp} [kg·m ⁻³]
1	1,24	18,308	752	79,32	20,68	3,79	70,68
2	1,05	15,251	740	79,42	20,58	3,14	69,20
3	1,52	20,943	702	78,04	21,96	4,60	70,04
4	1,25	16,149	658	79,57	20,43	3,30	61,10
5	0,91	13,433	752	79,91	20,09	2,70	68,65
6	1,78	22,286	638	79,94	20,06	4,47	58,14
7	0,90	12,481	706	80,45	19,55	2,44	62,76
\bar{x}				79,52	20,48		65,80

c) modřín opadavý

	l [mm]	m_0 [mg]	ρ [kg·m ⁻³]	Δ_{sp} [%]	Δ_{nosp} [%]	m_{nosp} [mg]	c_{nosp} [kg·m ⁻³]
1	1,24	22,608	929	80,42	19,58	4,43	82,64
2	1,69	20,929	631	80,71	19,29	4,04	55,30
3	1,41	15,360	555	79,92	20,08	3,08	50,64
4	1,11	19,687	903	79,91	20,09	3,96	82,49
5	1,01	17,743	895	81,33	18,67	3,31	75,93
6	0,74	8,082	556	84,08	15,92	1,29	40,25
7	1,21	35,095	1477	79,94	20,06	7,04	134,69
8	1,40	27,837	1013	79,58	20,42	5,68	93,99
\bar{x}				80,74	19,26		87,99

d) smrk ztepilý

	l [mm]	m_0 [mg]	ρ [kg·m ⁻³]	Δ_{sp} [%]	Δ_{nosp} [%]	m_{nosp} [mg]	c_{nosp} [kg·m ⁻³]
1	1,26	11,336	458	84,01	15,99	1,81	33,30
2	0,98	13,722	713	85,72	14,28	1,96	46,29
3	2,43	17,879	375	84,49	15,51	2,77	26,42
4	1,00	9,414	479	84,83	15,17	1,43	33,06
5	1,16	10,054	441	84,22	15,78	1,59	31,66
6	2,11	19,284	465	83,03	16,97	3,27	35,90
7	1,58	14,307	461	83,74	16,26	2,33	34,08
8	1,00	12,348	629	85,23	14,77	1,82	42,22
\bar{x}				84,41	15,59		40,42

Primárně bylo zkoumáno, zda hmotnost nebo hustota dřeva koreluje s charakteristikami zjištěnými po provedené termické analýze. Korelace nebyly potvrzeny; pravděpodobně zde hrají významnou roli i další faktory, jako je podíl letního nebo jarního dřeva, výskyt nehomogenit apod. Byly tedy vypočteny základní statistické charakteristiky

významných veličin – průměrné hodnoty a směrodatné odchyly pro spalitelný podíl a koncentraci nespalitelné složky (tab. 11). Tyto hodnoty posloužily jako elementární data pro provádění samotné termické analýzy a následně i hodnocení krátkodobě mineralizovaného dřeva.

Tab. 11 Základní charakteristiky referenčních vzorků dřevin – průměrné hodnoty spalitelného podílu $\overline{\Delta_{sp}}$ a koncentrace nespalitelné složky dřeva $\overline{c_{nesp}}$ s příslušnými směrodatnými odchyly $\sigma_{\Delta_{sp}}$ a $\sigma_{c_{nesp}}$

	$\overline{\Delta_{sp}}$ [%]	$\sigma_{\Delta_{sp}}$ [%]	$\overline{c_{nesp}}$ [kg·m ⁻³]	$\sigma_{c_{nesp}}$ [kg·m ⁻³]
Buk lesní	81,59	0,82	56,39	8,92
Dub	79,52	0,76	65,80	5,03
Modřín opadavý	80,74	1,46	87,99	31,99
Smrk ztepilý	84,41	0,86	40,42	8,24

Pozn.: Aritmetický průměr a směrodatná odchylna jsou vypočteny ze 7 (pro listnaté dřeviny) a 8 (pro jehličnaté dřeviny) hodnot.

Celkový počet provedených termických analýz z jednoho vzorku byl určován průběžně na základě porovnání dvou posledních měření. V případě, že se nespalitelný podíl po provedení měření neliší od předchozího o více než 1 %, je toto měření poslední. Hranice 1% byla stanovena na základě hodnot nespalitelných podílů referenčních vzorků, zejména na základě jejich směrodatných odchylek pro jednotlivé dřeviny, které se zpravidla pohybují do 1 % (tab. 11). Výjimku tvoří vzorky modřínu, u nějž (díky zmíněnému vzorku č. 6 se značně odlišnými parametry) je směrodatná odchylna vyšší (tab. 10c). V případě, že by byla hodnota vzorku č. 6 ze souboru vyřazena, klesla by směrodatná odchylna na 0,60 %, což je opět menší než 1 %. Při použití této mezní hranice lze částečně eliminovat vliv střídání jarního a letního dřeva, a také dalších nehomogenit.

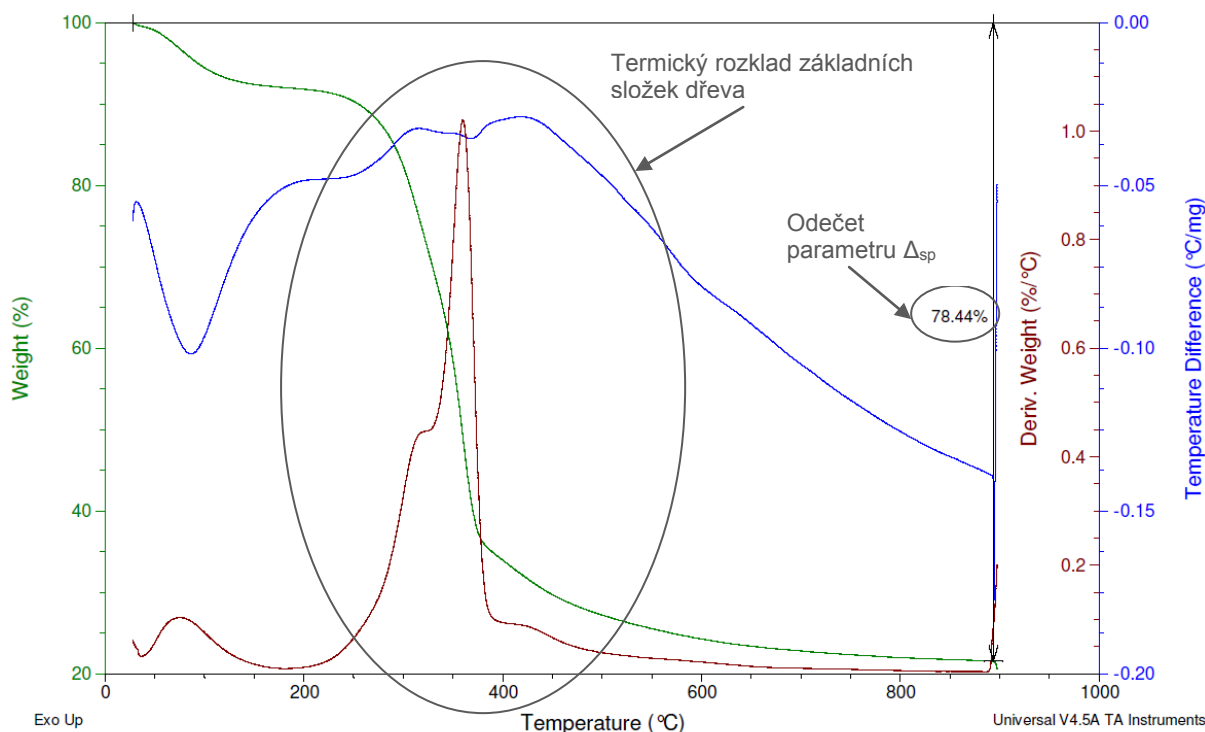
Po této úvodní analýze byly následně zkoumány i vzorky mineralizovaného dřeva. U nich byly bezprostředně po ošetření sledovány změny hmotnosti Δm v průběhu máčení, které byly vyjádřeny ve vztahu k počáteční hmotnosti vzorku před jeho mineralizováním (tab. 12). Změny hmotnosti jsou stejné, jako v případě vzorků pro SEM (viz kapitola 8.1).

Z primárních vzorků byly postupem popsáním v kapitole 8.2.1 připraveny vzorky pro termickou analýzu, které byly následně podrobeny tepelnému zatížení s konstantní rychlostí ohřevu 10°C·min⁻¹ v redukční atmosféře. Celkově bylo v rámci této etapy provedeno cca 330 zkoušek krátkodobě mineralizovaného dřeva a 3 analýzy odparků použitých roztoků. Pro každý vzorek bylo možné získat výsledky ve formě křivek znázorňujících procentuální změny hmotnosti, její derivaci podle teploty a teplotní změny (obr. 27, příloha 2). Z TG křivky (zeleně) byla odečtena zejména hodnota Δ_{sp} [%]. Na křivkách DTG (červeně) a DSC (modře) jsou v intervalu 200 °C až 600 °C viditelné typické změny spojené s termickou dekompozicí základních složek dřeva.

Tab. 12 Změny hmotnosti během máčení vzorku v roztoku přípravku Lukofob 39, Na_2SiO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro termickou analýzu

		t [dny]	1/6	1/3	1	3	7	14	28
Roztok Lukofob 39	Buk lesní		4,87 %	5,78 %	8,17 %	8,98 %	9,27 %	10,28 %	3,78 %
	Dub		1,41 %	1,96 %	2,80 %	3,92 %	4,11 %	3,57 %	-0,07 %
	Modřín opadavý		2,15 %	2,69 %	3,74 %	6,22 %	8,32 %	12,84 %	11,51 %
	Smrk ztepilý		3,82 %	4,78 %	7,42 %	13,45 %	22,42 %	25,82 %	17,70 %
Roztok Na_2SiO_3	Buk lesní		6,76 %	8,56 %	10,05 %	10,51 %	11,47 %	11,19 %	11,16 %
	Dub		1,12 %	1,47 %	1,63 %	1,76 %	1,26 %	-0,16 %	-0,58 %
	Modřín opadavý		2,43 %	2,20 %	2,94 %	3,73 %	4,03 %	4,10 %	8,56 %
	Smrk ztepilý		4,66 %	5,34 %	6,19 %	7,12 %	7,70 %	9,44 %	10,45 %
Roztok $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Buk lesní		1,77 %	2,58 %	6,94 %	9,06 %	10,37 %	12,39 %	19,95 %
	Dub		1,16 %	1,31 %	1,95 %	3,35 %	5,02 %	7,46 %	5,74 %
	Modřín opadavý		1,97 %	2,18 %	3,33 %	5,37 %	8,02 %	10,48 %	15,26 %
	Smrk ztepilý		3,85 %	4,42 %	5,87 %	6,98 %	8,23 %	9,30 %	11,91 %

Pozn.: Červeně označené hodnoty odpovídají délkám máčení testovaným pomocí termické analýzy.



Obr. 27 Příklad záznamu termické analýzy – modřín opadavý ošetřený přípravkem Lukofob 39 po dobu 14 dnů (6. válcové tělíčko od povrchu)

Na základě maximálního úbytku hmotnosti Δ_{sp} , odečítaného z křivky změn hmotnosti [%] byly stanoveny hodnoty nespalitelného podílu a následně vypočteny dle rovnic (6) až (8) hodnoty podílu minerálních částic v popelu Δ_{min} , hmotnost minerálního podílu v popelu m_{min} a koncentrace nespalitelné minerální složky ve dřevě c_{min} . V tabulce 13 jsou uvedeny takto

získané hodnoty pro povrchové vrstvy různě ošetřených vzorků, které byly vždy vypočteny jako průměr ze dvou měření. Mimo povrchových vrstev mohou být obdobným způsobem hodnoceny i jednotlivé řezy v dřevěném profilu (příloha 1).

Tab. 13 Charakteristiky mineralizovaného dřeva v povrchových vrstvách – podíl minerálních částic Δ_{min} , hmotnost minerálního podílu v popelu m_{min} a koncentrace nespalitelné minerální složky c_{min}

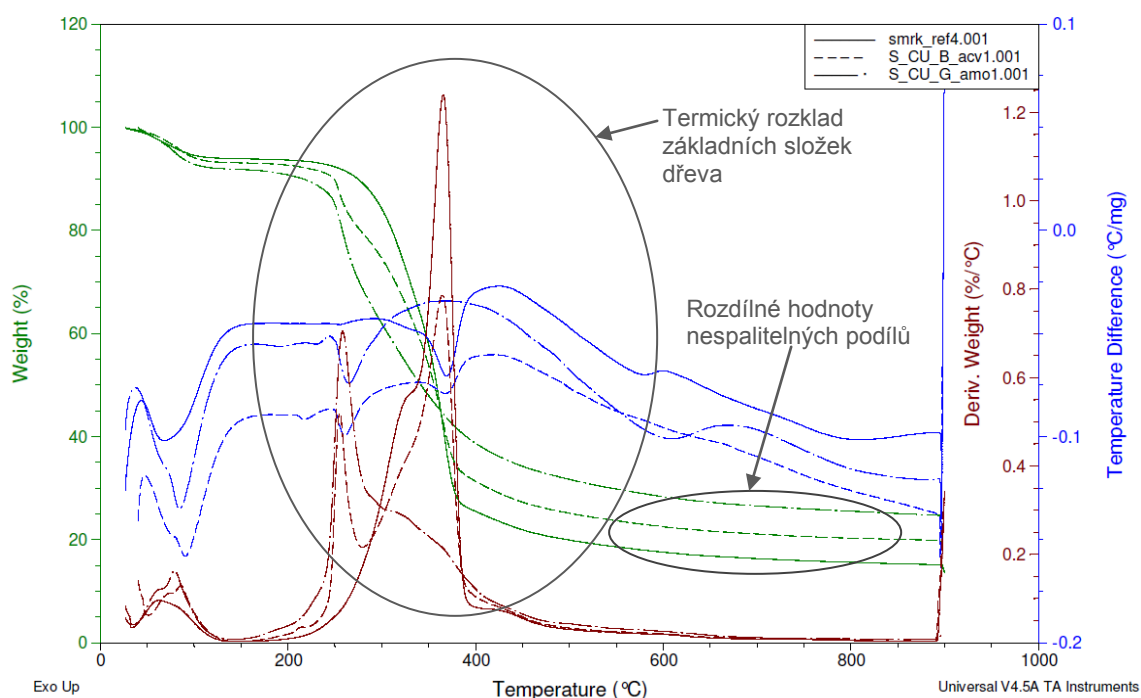
Roztok	Dřevina	Doba máčení [den]	Δ_{min} [%]	m_{min} [mg]	c_{min} [kg·m ⁻³]
Roztok CuSO ₄ ·5H ₂ O	Buk lesní	0,33	3,38	0,61	20,42
		28	9,41	1,33	61,24
	Dub	0,33	-0,33	-0,01	-0,27
		28	0,59	0,16	5,64
	Modřín opadavý	0,33	3,03	0,38	18,08
		28	5,34	0,75	39,18
	Smrk ztepilý	0,33	2,72	0,37	13,76
		28	5,62	0,75	28,90
Roztok Na ₂ SiO ₃	Buk lesní	0,33	15,22	3,19	103,86
		28	24,29	6,32	258,39
	Dub	0,33	4,42	0,72	26,87
		28	6,84	1,07	46,38
	Modřín opadavý	0,33	7,74	1,83	54,97
		28	13,35	2,17	87,10
	Smrk ztepilý	0,33	11,70	1,63	58,47
		28	16,64	2,55	99,83
Roztok Lukofob 39	Buk lesní	0,33	6,76	1,62	47,29
		1	14,56	3,13	103,66
		3	13,89	3,12	108,04
		7	15,10	1,50	90,14
		28	15,84	3,33	117,71
	Dub	0,33	4,65	0,81	30,75
		1	5,80	1,41	44,47
		28	14,75	2,81	87,16
		0,17	13,46	2,18	81,93
		0,33	10,78	1,85	69,86
	Modřín opadavý	1	12,13	1,94	81,49
		3	15,68	1,94	75,53
		7	16,61	2,38	76,61
		14	17,86	3,18	117,59
		28	18,11	2,89	90,01
		0,33	17,27	1,20	52,93
	Smrk ztepilý	1	14,85	1,88	68,20
		7	24,03	4,35	142,14
		14	19,79	1,66	65,91
		28	22,52	3,39	101,29

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten ze 2 hodnot získaných ze vzorků z protilehlých stran.

Jak je z tabulky 13 patrné, uvedené vztahy poměrně dobře kvantifikují proces mineralizace. Pouze v jediném případě, a to u vzorku dubu ošetřeného roztokem modré skalice po dobu 8 hodin, byly dopočteny záporné hodnoty. Tento výsledek lze vysvětlit poměrně malou retencí minerálních částic u těchto vzorků, což potvrzuje i SEM a pravděpodobně i výskyt letního dřeva na jeho povrchu. Nicméně u křemičitanů výsledky

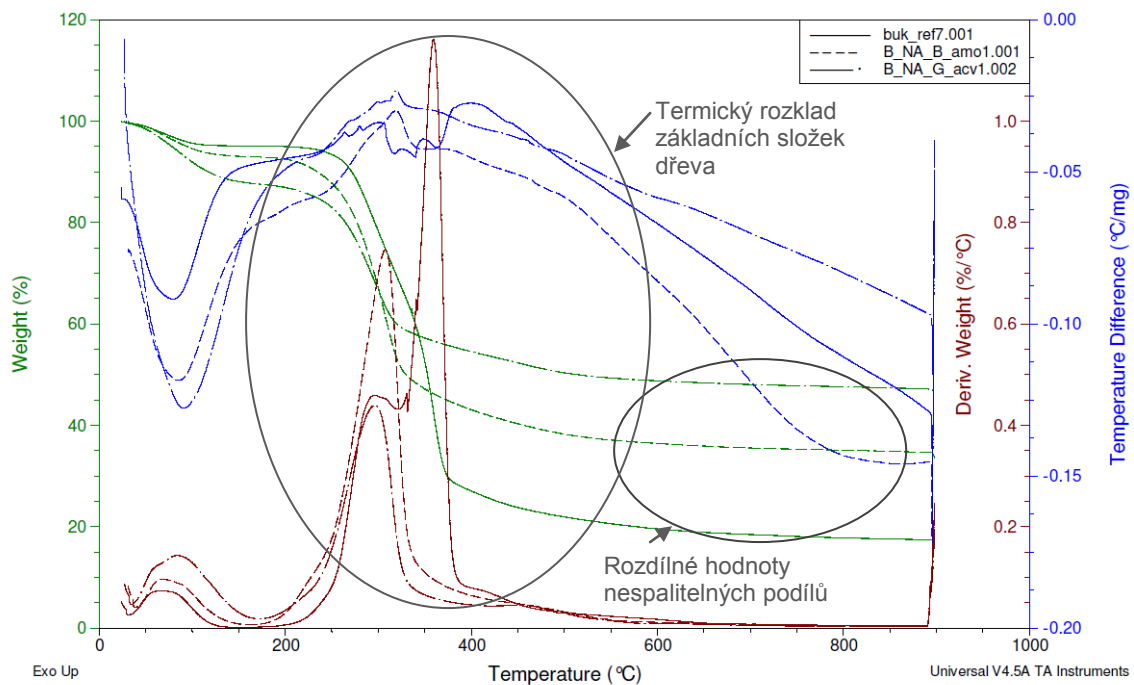
korespondují s tvrzením, že s rostoucí délkou expozice narůstá i podíl minerální složky v materiálu. Na výsledné hodnoty však mají vliv i další faktory (hustota dřeva, letní a jarní dřevo, výskyt nehomogenit, příprava vzorků atd.).

Kromě kvantifikace mineralizace mohou být sledovány taktéž změny patrné na termálních křivkách stanovených na vzorcích odebraných z povrchu mineralizovaného dřeva, které se liší dobou působení roztoku. Na obr. 28, znázorňujícím expozici v roztoku modré skalice, je z křivek sledujících změny hmotnosti (TG - zeleně) patrné, že s rostoucí expozicí v minerálním roztoku roste podíl nespalitelné (a tudíž i minerální) složky ve vzorku. Z křivek popisujících derivaci změny hmotnosti podle teploty (DTG - červeně) je naopak zřetelné, že působením chemické látky dochází k degradaci hemicelulózy i celulózy složky, pravděpodobně depolymerizací, což má za následek nárůst jednodušších polysacharidů nebo příslušných sacharidů. Křivky modelující tepelný tok (DSC - modře) změny v chemické struktuře vzorku taktéž potvrzují.

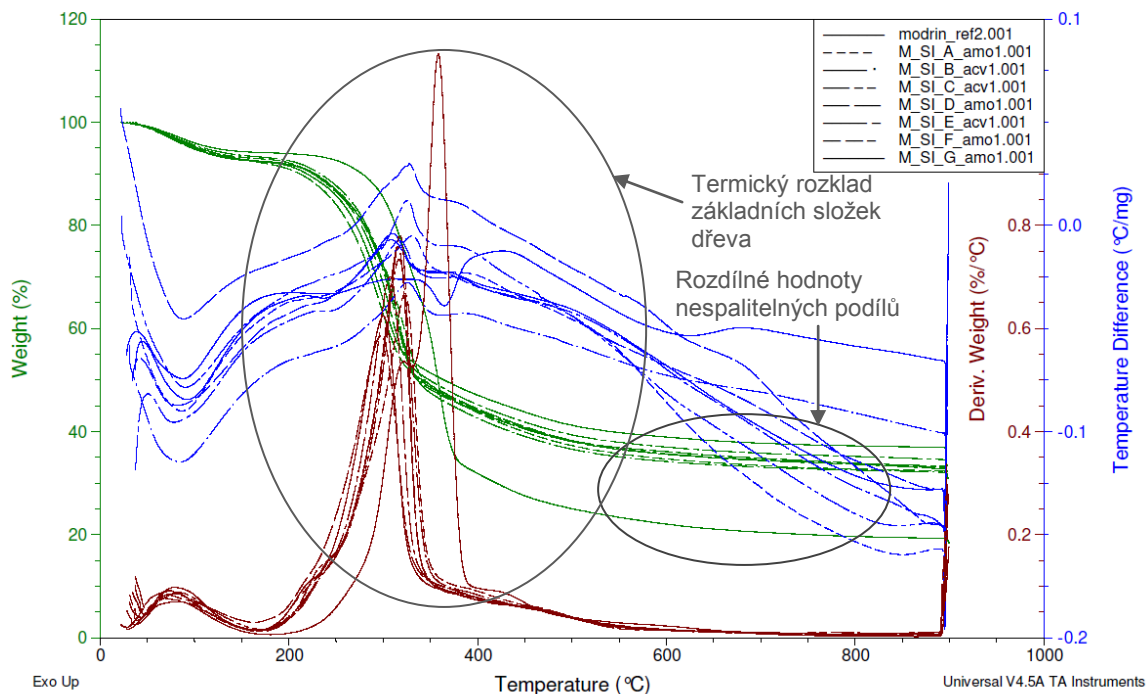


Obr. 28 Porovnání křivek termické analýzy u povrchových vrstev u smrku ztepilého: referenční vzorek (smrk_ref4), ošetřené vzorky roztokem modré skalice ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po dobu 8 hodin (S_CU_B_acv1), 28 dnů (S_CU_G_amo1)

Obdobné závěry jsou platné i pro vzorky ošetřené roztokem křemičitanu sodného, tzv. vodním sklem (obr. 29) a vzorky mineralizované organosilanem – Lukofob 39 (obr. 30).



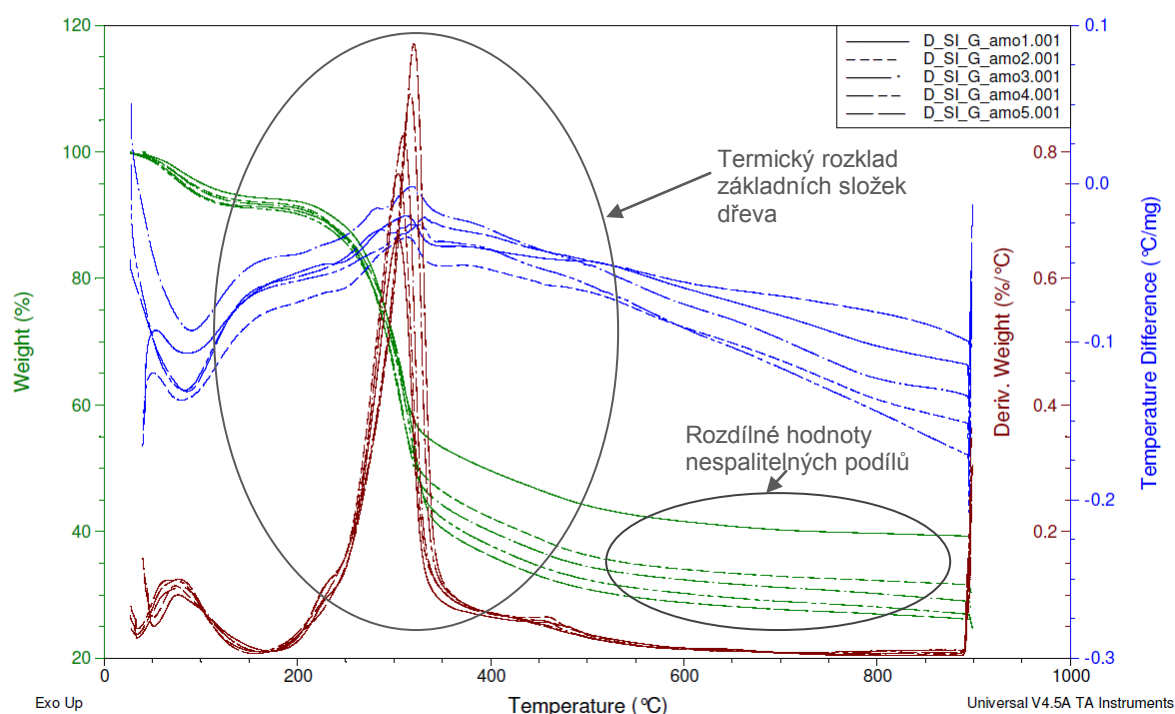
Obr. 29 Porovnání křivek termické analýzy povrchových vrstev u buku lesního: referenční vzorek (buk_ref7), ošetřené vzorky roztokem vodní skla (Na_2SiO_3) po dobu 8 hodin (B_NA_B_amo1), 28 dnů (B_NA_G_acv1)



Obr. 30 Porovnání křivek termické analýzy povrchových vrstev u modřínu opadavého: referenční vzorek (modrin_ref2), ošetřené vzorky roztokem přípravku Lukofob 39 po dobu 4 hodin (M_SI_A_amo1) 8 hodin (M_SI_B_acv1), 1 dne (M_SI_C_acv1), 3 dnů (M_SI_D_amo1), 7 dnů (M_SI_E_acv1) 14 dnů (M_SI_F_amo1), 28 dnů (M_SI_G_amo1)

Při porovnání TG křivek (zeleně) pro ošetření organosilanem je patrné, že penetrace roztoku díky poměrně nízké viskozitě je významná již při krátkodobé expozici (4 hodiny), a také proto se následně podíl minerální složky s délkou expozice výrazně nemění. Další grafické srovnání křivek provedených v rámci této části experimentů lze nalézt v příloze 2.

Druhou možností vyhodnocení profilu mineralizace je sledování křivek z tělísek, získaných jednostranným odběrem ze souvislého válcového vývrtu pomocí přírůstkového vrtáku (obr. 31). Na základě TG křivek (zeleně) můžeme sledovat distribuci minerální složky v jednom ze zvolených příčných směrů. Z uvedených výsledků logicky vyplývá, že podíl minerální složky v matici směrem od povrchu ke středu vzorků klesá. Další grafické srovnání křivek provedených v rámci této části experimentů lze nalézt v příloze 2.



Obr. 31 Termická křivka ze vzorků, získaných jednostranným odběrem z válcového vývrtu u dubu ošetřeného roztokem přípravku Lukofob 39 po dobu 28 dnů

Výše zmíněnou tendenci lze vyjádřit i pomocí bodových grafů (obr. 32), kde na spodní osy jsou vynášeny vždy vzdálenosti středu vzorku od povrchu a na svislé ose příslušná veličina, např. podíl minerální složky v popelu Δ_{min} nebo koncentrace nespalitelné minerální složky ve dřevě c_{min} . Uvedenými body je nejvhodnější proložit logaritmickou regresní křivku (obr. 32a), která má pro uvedený případ dubového profilu (obr. 31) a veličinu podíl minerální složky v popelu Δ_{min} v % následující tvar:

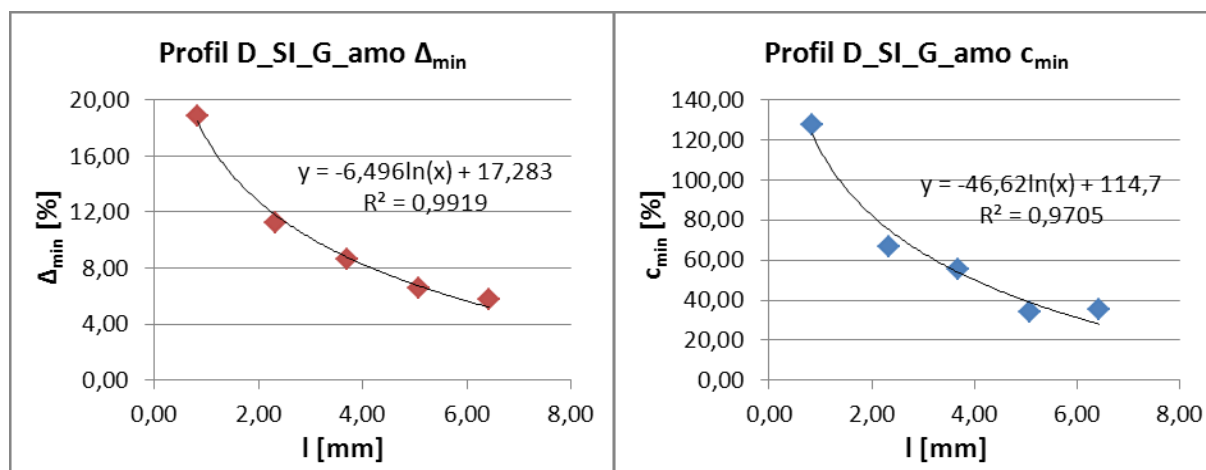
$$\Delta_{min} = -6,496 \ln(l) + 17,283 \quad (9)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,9919$.

Pro hodnocení koncentrace nespalitelné minerální složky ve dřevě c_{min} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], lze opět k proložení bodů (obr. 32b) využít logaritmickou křivku, a to v následujícím tvaru:

$$c_{\min} = -46,62 \ln(l) + 114,7 \quad (10)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,9705$.



a)

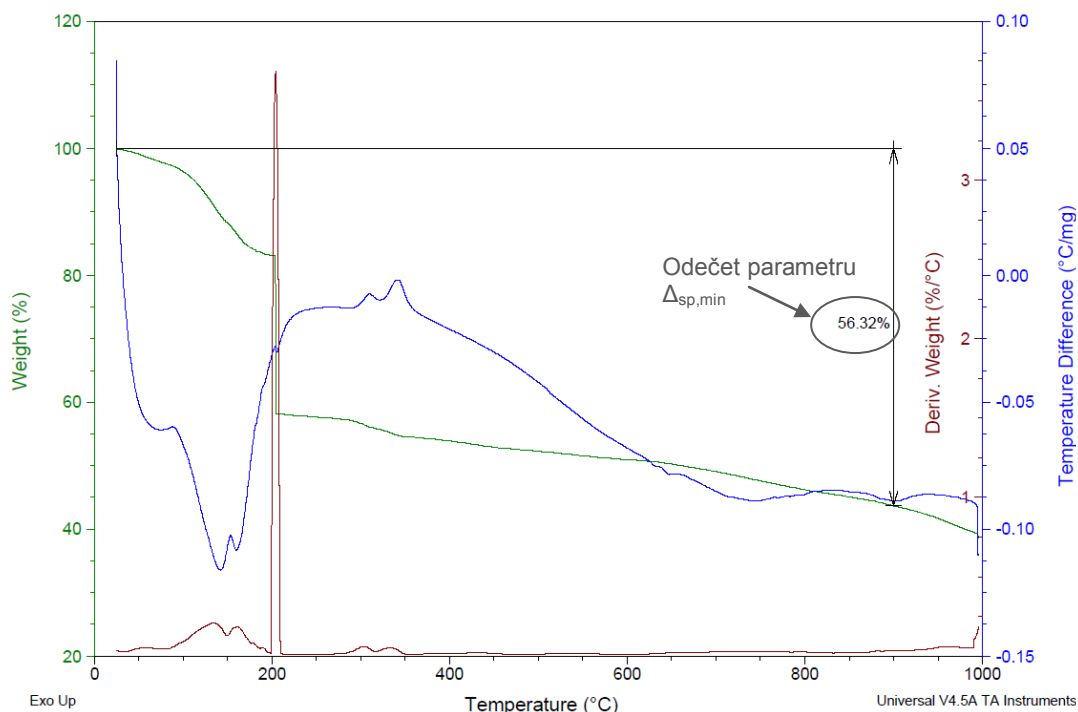
b)

Obr. 32 Podíl minerální složky v popelu Δ_{\min} (a) a koncentrace nespalitelné minerální složky c_{\min} (b) u vzorku dubu ošetřeného roztokem přípravku Lukofob 39 po dobu 28 dnů (odpovídající termické křivky viz obr. 31)

Je nutno konstatovat, že koncentrace nespalitelné minerální složky neposkytuje informaci o absolutním množství minerální fáze ve dřevě a to ze dvou základních důvodů:

- samotná dřevěná matrice obsahuje určitý minimální podíl minerálních látek;
- během provádění termické analýzy může docházet k rozkladu minerální složky (např. odstranění chemicky vázané vody, dekarbonatace apod.), která má za následek také pokles hmotnosti.

Eliminace zejména druhého zmíněného jevu je nejlépe možná v případě, kdy lze odseparovat, nebo jinak získat příslušnou minerální fázi. Tuto minerální část lze podrobit termické analýze, pro kterou by mělo být využito obdobného metodického postupu (shodná rychlost ohřevu, atmosféra výpalu atd.). V rámci provedených měření odparů jednotlivých roztoků bylo zjištěno, že hmotnostní ztráty $\Delta_{sp,min}$ [%] při 900 °C dosahovaly relativně vysokých hodnot. Konkrétně pro odparek roztoku modré skalice ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) činí $\Delta_{sp,min}$ 66,71 %, u odparku roztoku křemičitanu sodného (tzv. vodní skla) 40,14 % a u odparku roztoku organosilanu - Lukofob 39 je to 56,32 % (obr. 33).



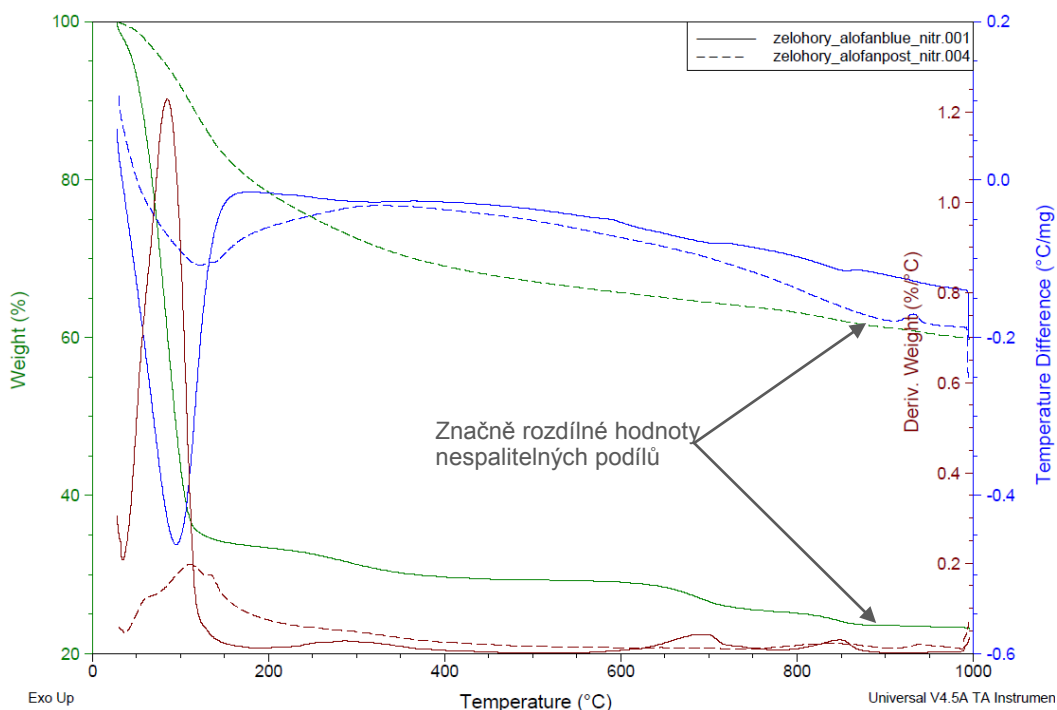
Obr. 33 Termická analýza odparku přípravku Lukofob 39 s vyznačením hmotnostní ztráty při 900 °C

Na základě těchto informací bylo nutné odvodit dodatečný vztah, který by přesněji vypovídal o množství uměle získané minerální fáze v dřevěné matrici. K získání takové charakteristiky postačí navýšit původní koncentraci nespalitelné minerální složky ve dřevě c_{min} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] právě o hodnotu hmotnostní ztráty neboli spalitelného podílu minerálního vzorku $\Delta_{sp,min}$ [%]. Výsledná rovnice pro výpočet koncentrace celkové minerální složky v mineralizovaném dřevě $c_{min,total}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] pak bude mít tvar:

$$c_{min,total} = \frac{c_{min}}{1 - \frac{\Delta_{sp,min}}{100}} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (11)$$

Vypočtené hodnoty celkové minerální složky v mineralizovaném dřevě $c_{min,total}$ jsou uvedeny taktéž v příloze č. 1.

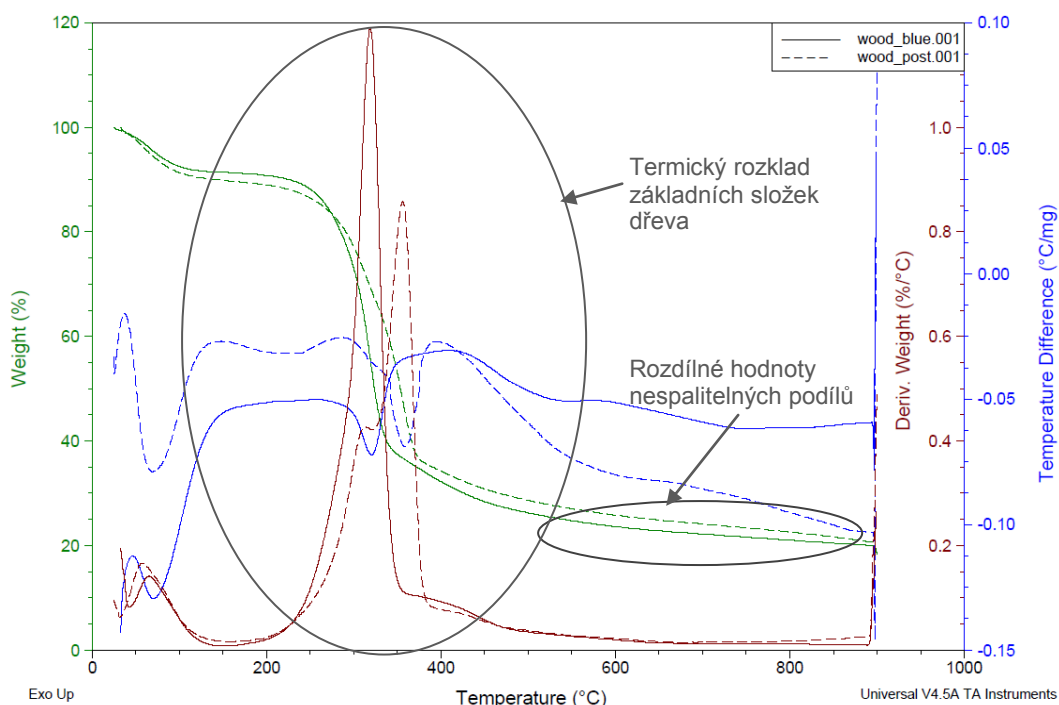
Obdobný pokus byl proveden i u přirozeně mineralizovaného dřeva, konkrétně alofánů (hydratovaných křemičitanů hlinitých v amorfní formě) a výdřev historických dolů z oblasti Zlatých hor. Při termické analýze bylo z TG křivek (zeleně) zjištěno, že hmotnostní úbytek (spalitelný podíl Δ_{sp}) vzorků samotných alofánů se u sousedních štol významně liší, konkrétně u tzv. Modré štoly je hmotnostní úbytek při 900 °C 76,34 % a u tzv. Poštovní štoly pouze 38,69 % (obr. 34). Z tohoto důvodu pro přesně stanovení obsahu minerální složky v konkrétním dřevě je nutné alofány odebrat z totožného místa jako výdřevy. Z DSC (modře) i DTG (červeně) křivek je patrné, že se liší i chemické složení obou výše uvedených alofánů.



Obr. 34 Porovnání výsledků termických analýz alofanů z Poštovní (čerchovaně) a Modré (plně) štoly s rychlostí ohřevu $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 1000°C v redukční atmosféře

Následně byly prováděny termické analýzy mineralizovaného dřeva z uvedených lokalit stejným způsobem jako v případě uměle mineralizovaného dřeva, tedy rychlostí výpalu $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 900°C v redukční atmosféře (obr. 35). Z křivek TG, DTG i DSC je patrné, že dochází k obdobným jevům jako v případě uměle mineralizovaného dřeva. Konkrétně lze u vzorků výdřev nalézt zvýšený podíl minerálních částic ve dřevě, a to především u vzorků odebraných z Poštovní štoly.

Na základě stanovených charakteristik, jako jsou výška a hmotnost tělesa a hodnota spalitelného podílu je možné jednoduše vypočítat objemovou hmotnost a parametry související s nespalitelným podílem (tab. 14) dle vztahů (3) až (5). Pro výpočet koncentrace minerálních látek je nutné znát dřevinu a spalitelný podíl samotné minerální části (obr. 34). Na základě objemové hmotnosti vzorku a faktu, že pro výrobu výdřev byly ve valné většině případů využívány jehličnaté dřeviny s krátkým vegetačním cyklem, můžeme určit jako původní dřevinu smrk. Pro přesnější určení druhu dřeviny je možné použít SEM. Vzhledem k tomu, že v tomto případě parametry $\Delta_{nsp,ref}$ a $\Delta_{sp,min}$ jsou k dispozici z předchozích měření alofanů a referenčních dřevin, můžeme charakteristiky týkající se mineralizace (tab. 14) dopočítat dle vztahů (6) až (8), respektive (11).



Obr. 35 Porovnání výsledků termických analýz výdřev z Poštovní (čerchovaně) a Modré (plně) štoly s rychlostí ohřevu $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 900°C v redukční atmosféře

Tab. 14 Charakteristiky přirozeně mineralizovaných výdřev – Zlaté hory

Štola	l [mm]	m_0 [mg]	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Δ_{sp} [%]	Δ_{nesp} [%]	m_{nesp} [mg]	c_{nesp} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Δ_{min} [%]	m_{min} [mg]	c_{min} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	$c_{\text{min,total}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Modrá	1,86	17,24	472	80,01	19,99	3,45	42,89	4,40	0,76	20,76	87,75
Poštovní	0,66	7,28	562	79,40	20,60	1,50	52,62	5,01	0,36	28,15	45,91

Uvedené výsledky potvrzují, že znalost spalitelného podílu odparku nebo samotné minerální složky $\Delta_{\text{sp,min}}$ je pro odhad celkové minerální složky v mineralizovaném dřevě $c_{\text{min,total}}$ klíčová. Bez těchto informací může být stanoven pouze parametr c_{min} , který může nabývat hodnot značně nižších (viz tab. 14).

8.3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VAZBY ORGANOSILANU NA BUNĚČNOU STĚNU

8.3.1 POSTUP EXPERIMENTU

Pro experimentální určení vazby organosilanu na buněčnou stěnu dřeva byly vyrobeny vzorky s rozměry $30 \times 20 \times 20$ mm (L×R×T), které se obvykle používají pro stanovení pevnosti v tlaku podél i kolmo na vlákna u malých bezvadných těles dle ČSN 490110 [12]. Pro výrobu celkově 20 těles byly použity tyto dřeviny (viz kapitola 6.1.):

- smrk ztepilý (*Picea abies* L.);
- modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.);
- buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) a
- dub (*Quercus* SPP.).

Jednotlivá tělesa byla před ošetřením vysušena při 105 ± 3 °C do ustálené hmotnosti a následně byla stanovena jejich hmotnost $m_{before-treat}$ na analytických vahách s přesností na 0,0001 g a rozměry a_0 , b_0 , c_0 posuvným měřidlem s přesností na 0,01 mm.

Účelem experimentu je dlouhodobé vystavení vzorku dřeva působení mineralizačního roztoku. Vzorky byly ponořeny do neředěného přípravku Lukofob 39 (viz kapitola 6.2) po dobu 7 dnů (použity 2 vzorky z každé dřeviny) a 28 dnů (použity 3 vzorky z každé dřeviny) za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa a teploty 20 ± 1 °C.

Po uplynutí uvedené doby expozice byly vzorky vyjmuty z roztoku a povrchově osušeny filtračním papírem, tak aby zbytková kapalina nemohla zejména po dobu následujících 5 minut pronikat hlouběji do vzorků. Následně byla stanovena jejich hmotnost $m_{after-treat}$ na analytických vahách s přesností na 0,0001 g a tyto vzorky byly ponechány nejprve v laboratorních podmínkách s teplotou 23 ± 2 °C a R. V. 50 ± 5 % a poté vysušeny do ustálené hmotnosti při 105 ± 3 °C. Po vysušení byly vzorky vloženy do exsikátoru, kde byly ponechány do dosažení laboratorní teploty. Poté opět byly stanoveny rozměry těles a_x , b_x , c_x posuvným měřidlem s přesností na 0,01 mm.

Z naměřených hodnot byl pro každý vzorek vypočten objem vzorku před ošetřením V_0 , po ošetření V_x , a příjem aktivní silanolové složky AI pomocí retenčního parametru $R_{AI-Volume}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] s použitím rovnice:

$$R_{AI-Volume} = \frac{m_{after-treat} - m_{before-treat}}{V_0} \cdot \frac{20}{100} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (12)$$

Z objemů těles, stanovených před provedením mineralizace V_0 [cm^3] a po mineralizaci V_x [cm^3], byla vypočtena procentuální změna objemu ΔV_x [%] dle rovnice:

$$\Delta V_x = \frac{V_x - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

8.3.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Objemový příjem aktivní silanolové složky AI, konkrétně molekul methylsilanolátu draselného přítomných v přípravku Lukofob 39, je pro vzorky modřínu, smrku, buku a dubu uveden v tabulce 15. Tyto hodnoty byly stanoveny jako aritmetické průměry z provedených měření.

Tab. 15 Objemový příjem aktivní silanolové složky AI dřevěných vzorků pro experimentální stanovení vazby minerální látky na buněčnou stěnu

	Dřevina	Doba expozice	
		7 dnů	28 dnů
Příjem AI $R_{AI-Volume}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Buk lesní	95,9	122,0
	Dub	65,6	90,3
	Modřín opadavý	63,3	95,2
	Smrk ztepilý	105,6	103,3

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten ze 2 (pro 7 denní expozici) a 3 (pro 28 denní expozici) hodnot.

Na základě měření provedených dle postupu uvedeného v kapitole 8.3.1 byly stanoveny potřebné hodnoty:

- objemů V_0 absolutně suchých těles před zkouškou;
- objemů V_1 absolutně suchých těles po provedení mineralizace v délce 7 dní;
- objemů V_2 absolutně suchých těles po provedení mineralizace v délce 28 dní.

Tab. 16 Objemové změny testovaných vzorků dřeva v důsledku umělé mineralizace

Dřevina	Č.	V_0 [cm ³]	V_1 [cm ³]	V_2 [cm ³]	ΔV_1 [%]	ΔV_2 [%]	$\overline{\Delta V_1}$ [%]	$\overline{\Delta V_2}$ [%]
Buk lesní	1	10,90	11,29		3,58		2,00	2,10
	2	10,87		10,99		1,08		
	3	10,69		10,96		2,54		
	4	10,60	10,64		0,41			
	5	10,67		10,96		2,68		
Dub	1	11,12	11,32		1,81		1,43	1,69
	2	10,90		11,06		1,49		
	3	10,91		11,30		3,58		
	4	10,93		10,93		-0,01		
	5	11,01	11,13		1,04			
Modřín opadavý	1	11,05	11,17		1,08		1,77	4,02
	2	10,94	11,21		2,45			
	3	11,02		11,44		3,83		
	4	10,94		11,40		4,21		
	5	11,13		11,57		4,02		
Smrk ztepilý	1	11,14		11,58		3,95	3,97	5,59
	2	11,06		11,75		6,19		
	3	11,15	11,70		4,92			
	4	11,05		11,78		6,62		
	5	10,98	11,31		3,02			

Z uvedených hodnot vyplývá, že již po 7 dnech působení minerálního roztoku dochází k nárůstu objemu těles ΔV_1 , což potvrzuje navázání minerální složky na buněčnou stěnu dřeva. Po 28 dnech není nárůst objemu ΔV_2 již tak výrazný. Důvodem je pravděpodobně to, že penetrace do buněčné stěny je částečně blokována vzniklými minerálními novotvory a při dlouhodobé expozici jsou minerální látky ukládány ve formě povlaků a výplní především v lumenech. Vazba na buněčnou stěnu již v této fázi není pravděpodobně tak významná.

Nárůst objemu vzorků po 7 dnech dosahuje konkrétně hodnot mezi 1,43 až 3,97 % a po 28 dnech (nejdelší použitá aplikační doba roztoku) jeho hodnoty dosahují 1,69 až 5,59 %. Rozdílné hodnoty jsou ovlivněny především druhem dřeviny, který má taktéž vliv na hodnoty příjmu aktivní složky roztoku (viz kapitola 4.3).

Uvedená zjištění plně korespondují i s výsledky SEM a potvrzují vhodnost použití výše popsané experimentální metody.

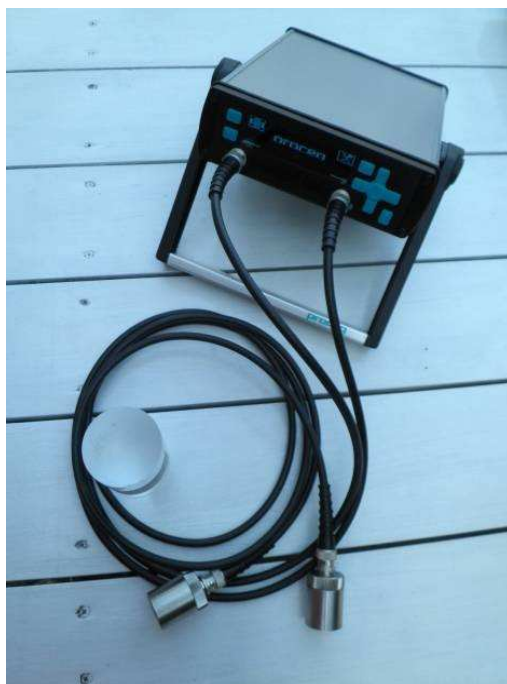
9. DIAGNOSTIKA MINERALIZOVANÉHO DŘEVA IN SITU

9.1 APLIKACE ULTRAZVUKOVÉ PRŮCHODOVÉ METODY

9.1.1 POSTUP ZKOUŠKY

Pro ověření použitelnosti ultrazvukové průchodové metody pro diagnostiku mineralizovaného dřeva in situ byly použity původní konstrukční profily i fragmenty výdřev historických dolů z oblasti Zlatých hor (viz kapitola 6.3).

Pro měření byl použit přístroj Pundit LAB (obr. 36), pracující na bázi šíření ultrazvukových vln, který se ve stavebnictví používá zejména pro hodnocení betonových a ocelových konstrukcí. V současné době se aplikuje také při diagnostice dřevěných prvků, avšak tento nehomogenní, anizotropní, obvykle povrchově značně poškozený materiál vyžaduje modifikaci existujících zkušebních postupů. Nastavením parametrů je možné měnit frekvenci vlnění (24, 37, 54, 82, 150, 200, 220, nebo 500 kHz), a variabilní průrazné napětí (125, 250, 350, nebo 500 V) [81].



Obr. 36: Přístroj Pundit LAB

Před zahájením měření byly stanoveny vlhkost dřeva a rozměry zkoumaného prvku (s maximální přesností), z kterých byla určena vzdálenost mezi sondami přístroje. Dále bylo zajištěno akustické spojení mezi sondami a povrchem vzorku během testu, a to úpravou povrchu a použitím adekvátního spojovacího prostředku. Povrch zkoušeného vzorku byl ve většině případů upraven smirkovým papírem nebo ohoblován. Jako spojovací prostředek byly otestovány vodivý gel a plastická hmota (formela). Následně byl přístroj kalibrován pro zvolené průrazné napětí, frekvenci ultrazvukového vlnění a použitou spojovací hmotu [26, 54, 81].

Samotné měření začíná přiložením sond (obr. 37), opatřených spojovacím prostředkem, na povrch zkoumaného materiálu. Následně je stanoven čas průchodu vlnění t [s] (od vyslání pulzu budičem až po jeho zaznamenání snímačem). Z rovnice (14), kde L [m] je délka měřicí základny (vzdálenost středů dotykových ploch obou sond) je vypočtena požadovaná pulzní rychlost v_{uz} [$m \cdot s^{-1}$] [25]:

$$v_{uz} = \frac{L}{t} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14)$$



Obr. 37 Měření s přístrojem Pundit LAB (přiložení sond k povrchu vzorku)

U větších nebo silně degradovaných profilů se přesnost měření snižuje, případně je problematické odečíst stabilní signál. Z tohoto důvodu je vhodné pro takové prvky volit maximální hodnoty průrazného napětí (pro Pundit LAB max. 500 V). Vzdálenost by měla být rovna nebo menší než vlnová délka vysílaného vlnění. Pro dřevěné prvky bylo optimálních výsledků dosaženo s frekvencí 150 kHz [81].

Pokud se objeví během prováděného měření tzv. chybová obrazovka, znamená to, že nebyl přijat žádný stabilní signál. V takovém případě je obvykle nutné povrch konstrukce dále upravit (hoblováním, broušením atd.). Jestliže není možné ani u povrchově upravených konstrukcí odečíst stabilní signál, lze:

- prohlásit prvek za poškozený, jež není možné dále využít a musí být vyměněn;
- odebrat kvádrové vzorky, na nichž je změřena impulzová rychlost; zde se však již jedná o destrukci dřevěného prvku.

Základním výstupem měření je čas průchodu ultrazvukového vlnění a z něj odvozená impulzová rychlost. U prvků se známou hustotou dřeva lze vypočítat také dynamický modul pružnosti zkoumaného materiálu, musí však být zohledněna anizotropie materiálu a tedy i rozdílné rychlosti vlnění.

9.1.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

U jednotlivých měřených prvků bylo prováděno testování ultrazvukovou průchodovou metodou zejména ve směrech kolmých k axiálnímu směru, s nastavenou frekvencí vlnění 150 kHz a průrazným napětím 500 V, jež je možné aplikovat také in situ. Vzdálenosti sond se pohybovaly mezi 75 a 270 mm.

Impulzovou rychlost však bylo možné stanovit jen pro menší vzdálenosti sond (přibližně do 200 mm), a to pouze pro povrchově nedegradované prvky bez výskytu výrazných poškození a dutin. U fragmentů výdřev a ostatních vzorků k odečtu stabilního signálu nedošlo v žádném z prováděných měření.

Důležitým poznatkem je především fakt, že měření bylo často možné provést až po úpravě (nejčastěji zbrúšení) povrchové vrstvy. Tímto zásahem však dochází k částečnému nebo úplnému odstranění povrchové mineralizované části, která má být diagnostikována.

Na základě získaných poznatků je nutno konstatovat, že testovaná metoda není vhodná pro diagnostiku mineralizovaných dřevěných konstrukčních prvků in situ. Detailní informaci o mineralizaci nebo degradaci zkoušených prvků samotným měřením ultrazvukovou průchodovou metodou nebylo možné získat.

Z výše popsaných důvodů lze doporučit nahrazení ultrazvukové metody jinými vhodnými nedestruktivními nebo semidestruktivními metodami, jako např. použitím přístrojů Pilodyn, Resistograph nebo Fractometr [54]. Možné je také doplnění měření o vhodné analytické metody, například SEM (viz kapitola 8.1) nebo termickou analýzu (viz kapitola 8.2).

9.2 APLIKACE METODY ODPOROVÉHO VRTÁNÍ

9.2.1 POSTUP ZKOUŠKY

Aplikace odporového vrtání byla nejprve experimentálně testována na laboratorně připravených tělesech. Pro jejich výrobu byly použity primární vzorky s rozměry 300 × 125 × 125 mm (L×R×T) ze smrku ztepilého (*Picea abies* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Quercus* SPP.) (viz kapitola 6.1). Vzorky nebyly před experimentem sušeny, aby příjem roztoku nebyl ovlivněn strukturními změnami vzniklými při vysychání. Pro každý vzorek byla před máčením v mineralizačním roztoku stanovena hmotnost m_0 s přesností na 0,1 g a vlhkost w_0 hrotovým odporovým vlhkoměrem s přesností na 0,1 %.

K ošetření vzorků byly použity 3 chemikálie, jejichž detailní popis je uveden v kapitole 6.2:

- Lukofob 39 ve formě vodného roztoku s hmotnostní koncentrací 50 %;
- neředěný roztok vodní skla (Na_2SiO_3);
- vodný roztok síranu měďnatého pentahydrátu (modré skalice) v ředění 20 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ na 100 ml demineralizované vody.

Vzorky dřeva byly nejprve ošetřeny ponořením do uvedených roztoků za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa, teploty 20 ± 1 °C, a doby máčení 1 (pouze pro Lukofob 39) nebo 28 dnů (pro všechny roztoky). Po vyjmutí z roztoku byly vzorky osušeny filtračním papírem tak, aby dále nedocházelo k pronikání roztoku do materiálu. Během máčení byly vypočteny změny hmotnosti Δm [%] po 4 a 8 hodinách a po 1, 3, 7, 14, a 28 dnech, z hmotnosti m_1 , stanovené v uvedených časových intervalech, a počáteční hmotnosti před ošetřením m_0 podle vztahu (2).

Poté byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí s teplotou 20 ± 1 °C dokud nedosáhly rovnovážné vlhkosti. V tomto prostředí byly ponechány i vzorky referenční – bez minerálního ošetření.

Kromě laboratorně připravených těles byla použitelnost této metody testována i na profilech z původních konstrukcí a důlních výdřevách s potenciálním výskytem mineralizace (viz kapitola 6.3), podobně jako v případě ultrazvukové průchodové metody.

Pro testování byl použit zejména přístroj IML Resistograph PD – 200 (obr. 38) s hloubkou vrtání až 20 cm a volitelnou rychlostí vrtání (max. 250 cm za minutu). Průběh vrtání je zobrazován na displeji a data lze přenášet do počítače. Výsledky měření jsou uváděny v 100 násobku procent maximální amplitudy, která je pro daný přístroj $2500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 38 IML Resistograph PD – 200

Doplňkové měření profilů s potenciálním výskytem mineralizace bylo provedeno přístrojem Resistograph Rinntech 4453-P (obr. 39) s hloubkou vrtání až 45 cm a rychlostí vrtání $40 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, který má integrovanou termotiskárnu a zároveň umožňuje i přenos dat do počítače (záznam až 500 měření). Jednotkou vrtného odporu je $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$.



Obr. 39 Měření s přístrojem Resistograph 4453-P

Během takovéto zkoušky se Resistograph umístí svou hlavou k měřenému prvku pod úhlem 90° na tangenciální nebo radiální povrch a poté se spustí vrtání. Směry vrtání jsou dány nejčastější dostupností povrchů profilů při měření in situ. Po celou dobu zkoušky je nutné přístroj udržovat ve stejné poloze, aby nedošlo k ohnutí nebo zlomení vrtací jehly. Měření je ukončeno v případě, kdy jehla pronikne celým prvkem. V průběhu celého měřeného profilu (resp. linie) je zaznamenáván vrtný odpor ve vzdálenostním intervalu 0,1 mm. Ze získaných hodnot je pak možné vypočítat průměrnou hodnotu vrtného odporu pro daný vrt. V případě vícenásobného měření je vypočtena průměrná hodnota vrtného odporu pro daný vzorek, eventuálně dřevinu.

U laboratorních těles byly nejprve testovány referenční vzorky, přičemž pro každou dřevinu bylo provedeno šest měření v příčných směrech mimo viditelné vady. Z jednotlivých naměřených hodnot vrtného odporu byla pro každý vzorek vypočtena průměrná hodnota vrtného odporu a příslušná směrodatná odchylka průměrných hodnot. Následně bylo provedeno měření uměle mineralizovaných dřevin. U každého testovaného vzorku byla provedena dvě měření v příčných směrech (kolmých ke směru axiálnímu), z kterých byl následně vypočten průměrný vrtný odpor pro danou dřevinu, roztok a dobu máčení. Z každého vrtu byl také vytvořen grafický záznam průběhu vrtného odporu.

Obdobným způsobem byly také testovány profily s potenciálním výskytem mineralizace, tj. byla provedena minimálně dvě měření ve dvou směrech kolmých k axiálnímu (podélnému) směru.

9.2.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Změny hmotnosti uměle mineralizovaných profilů v průběhu máčení, vyjádřené ve vztahu k počáteční hmotnosti vzorku před jeho mineralizací, jsou uvedeny v tab. 17. Testovány vrtnou metodou byly následně všechny délky máčení.

Tab. 17 Změny hmotnosti vzorků profilů během jejich máčení v roztocích přípravků Lukofob 39, Na_2SiO_3 a $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro vrtnou metodu

t [dny]		1/6	1/3	1	3	7	14	28
Roztok Lukofob 39	Buk lesní	4,87 %	5,78 %	8,17 %	8,98 %	9,27 %	10,28 %	3,78 %
	Dub	1,41 %	1,96 %	2,80 %	3,92 %	4,11 %	3,57 %	-0,07 %
	Modřín opadavý	2,15 %	2,69 %	3,74 %	6,22 %	8,32 %	12,84 %	11,51 %
	Smrk ztepilý	3,82 %	4,78 %	7,42 %	13,45 %	22,42 %	25,82 %	17,70 %
Roztok Na_2SiO_3	Buk lesní	6,76 %	8,56 %	10,05 %	10,51 %	11,47 %	11,19 %	11,16 %
	Dub	1,12 %	1,47 %	1,63 %	1,76 %	1,26 %	-0,16 %	-0,58 %
	Modřín opadavý	2,43 %	2,20 %	2,94 %	3,73 %	4,03 %	4,10 %	8,56 %
	Smrk ztepilý	4,66 %	5,34 %	6,19 %	7,12 %	7,70 %	9,44 %	10,45 %
Roztok $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Buk lesní	1,77 %	2,58 %	6,94 %	9,06 %	10,37 %	12,39 %	19,95 %
	Dub	1,16 %	1,31 %	1,95 %	3,35 %	5,02 %	7,46 %	5,74 %
	Modřín opadavý	1,97 %	2,18 %	3,33 %	5,37 %	8,02 %	10,48 %	15,26 %
	Smrk ztepilý	3,85 %	4,42 %	5,87 %	6,98 %	8,23 %	9,30 %	11,91 %

U referenčních vzorků byla pro každou dřevinu stanovena průměrná hodnota a příslušná směrodatná odchylka průměrných hodnot vrtného odporu na základě provedených 6 měření (tab. 18). Z tabulky je patrné, že hodnoty vrtného odporu vykazují

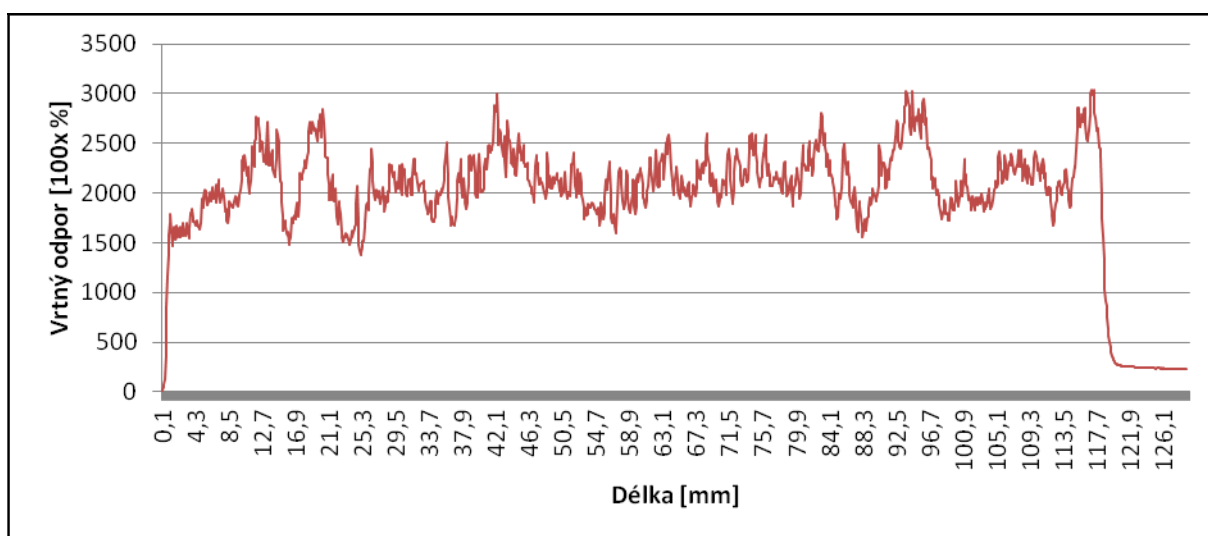
u dřeva dubu poměrně značného rozptylu (vysoká hodnota směrodatné odchylky) ve srovnání s ostatními testovanými dřevinami. Tato skutečnost je velmi pravděpodobně způsobena lokálními rozdíly v tvrdosti materiálu v důsledku nehomogenit různého charakteru, jež jsou pro dubové dřevo typické [22, 23].

Tab. 18 Hodnoty vrtného odporu u referenčních vzorků dřevin

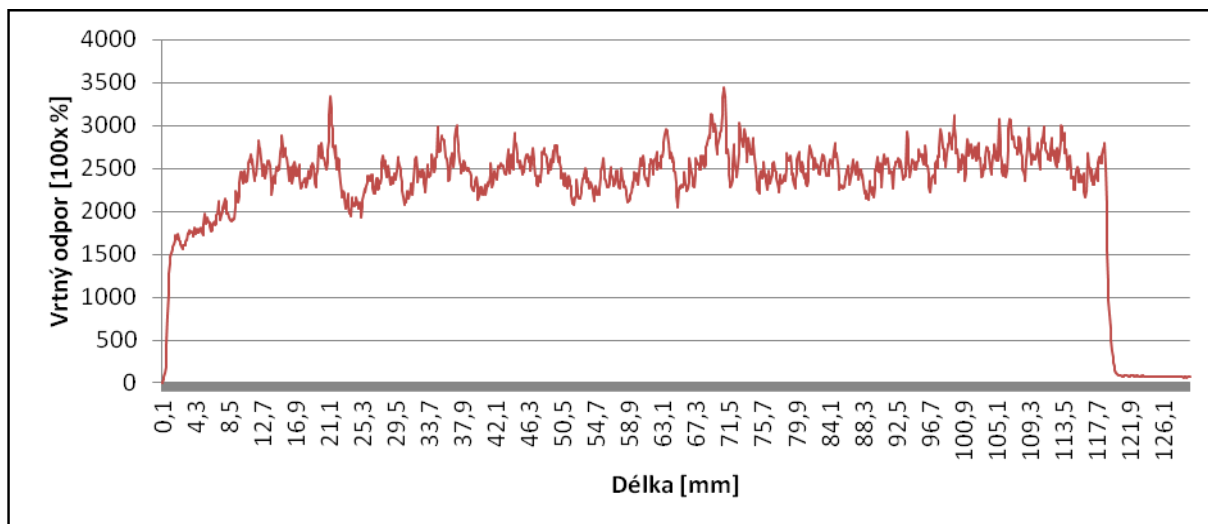
Dřevina	Vrtný odpor [100× %]	
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Buk lesní	2516	49
Dub	2534	304
Modřín opadavý	1552	37
Smrk ztepilý	915	49

Pozn.: Statistické charakteristiky jsou vypočteny z 6 hodnot průměrného vrtného odporu, získaných z 6 měření.

U profilů uměle mineralizovaných přípravkem Lukofob 39 byly pro každý provedený vrt získány hodnoty vrtného odporu, z kterých byly vytvořeny křivky monitorující vrtný odpor v konkrétním měřeném místě profilu (obr. 40). S výjimkou vzorků ošetřených roztokem vodního skla (Na_2SiO_3), jsou u všech získaných křivek patrné nižší hodnoty vrtného odporu na počátku křivky. Vzhledem k tomu, že se jedná o nedegradované profily, jsou tyto nízké hodnoty pravděpodobně způsobeny provedenou mineralizací. Jak v případě prostředku Lukofob 39 (zásaditá látka) tak u skalice modré (kyselá látka) dochází při kontaktu s dřevem k chemickému narušení jeho struktury. Degradovaná povrchová vrstva pak klade nižší odpor jehle vrtného přístroje. Nenulové zakončení záznamu, viditelné na prezentovaných grafech (obr. 40, 41, 42), může být způsobeno řadou faktorů (např. poškozením jehly, nehomogenitou dřeva, výskytem tvrdšího letního dřeva). Zde je však nenulové zakončení pravděpodobně způsobeno excentricitou jehly při měření a vznikajícím třením mezi jehlou a vrtným kanálkem.



Obr. 40 Záznam měření vrtného odporu u vzorku dubu ošetřeného prostředkem Lukofob 39 po dobu 28 dnů



Obr. 41 Záznam měření vrtného odporu vzorku buku ošetřeného modrou skalicí ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po dobu 28 dnů

Pro každý vrt byla také vypočtena průměrná hodnota vrtného odporu. Pro jednotlivé ošetřené vzorky byla provedena vždy 2 měření a z nich vypočten průměrný vrtný odpor vzorku (tab. 19, 20, 21). Z tabulky 19 je patrné, že hodnota průměrného vrtného odporu není závislá na délce máčení dřeva v mineralizačním roztoku. Mineralizací jsou u všech přípravků ovlivněny pouze přívrchové partie vzorku, které nemají na výsledky měření zásadní vliv.

Tab. 19 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených přípravkem Lukofob 39

Délka máčení [den]	Vrtný odpor [100× %]			
	Modřín opadavý	Smrk ztepilý	Buk lesní	Dub
1/6	1505	922	2534	2195
1/3	1423	839	2732	2121
1	1506	877	2708	2048
3	1533	982	2196	2153
7	1575	999	2699	2631
14	1483	847	2695	2449
28	1469	1032	2371	2084

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten ze 2 hodnot – měření v příčných, na sebe kolmých směrech.

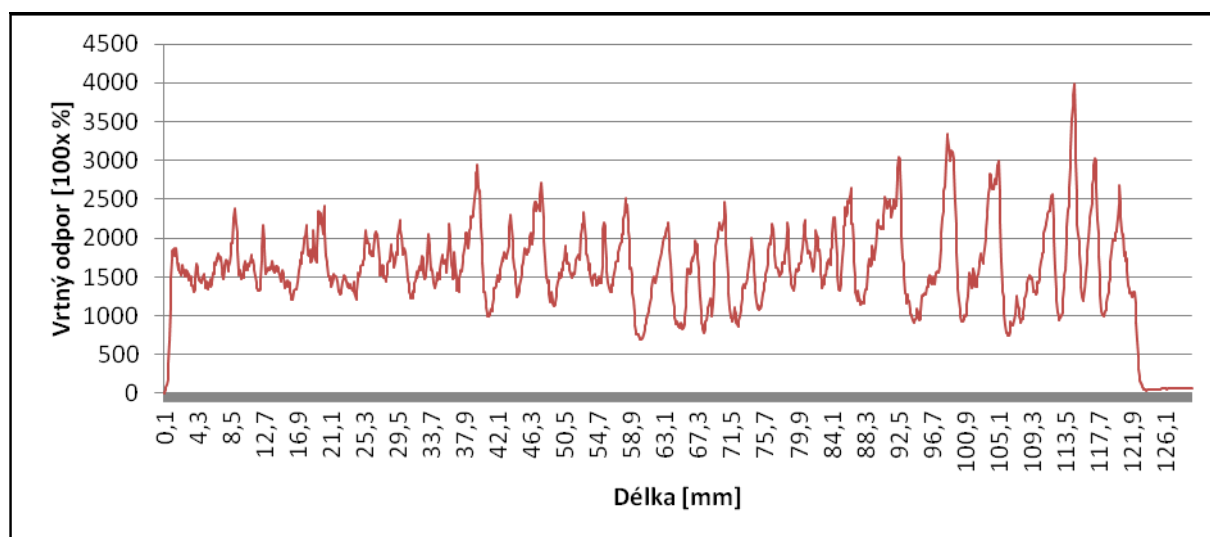
Tab. 20 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených modrou skalicí ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Délka máčení [den]	Vrtný odpor [100× %]			
	Modřín opadavý	Smrk ztepilý	Buk lesní	Dub
1/6	1594	902	2553	2069
1/3	1575	997	2271	2515
1	1544	1023	2687	2229
3	1565	1031	2645	2377
7	1647	1120	2602	2477
14	1728	1061	2641	2191
28	1641	896	2464	2300

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten ze 2 hodnot – měření v příčných, na sebe kolmých směrech.

Hodnoty vrtného odporu obecně závisí na druhu dřeviny a hustotě dřeva [45, 54], kolísání hodnot vrtného odporu během měření je ovlivněno výskytem anomálií v hmotě dřeva, např. suků, trhlin, tlakového dřeva atd.

Průběh křivek z měření vrtného odporu na vzorcích dřeva mineralizovaných roztoky vodního skla (Na_2SiO_3) vykazuje obdobný charakter jako u výše popsaných prostředků. Z křivky na obr. 42 je patrné, že hodnota vrtného odporu v povrchových vrstvách není výrazně ovlivněna ani po 28 dnech máčení. Vodní sklo sodné sice jako zásaditá látka narušuje povrchovou strukturu dřeva, současně však dochází k intenzivnímu ukládání minerálních částic v lumenech buněk, které kompenzuje pokles tvrdosti dřeva v důsledku degradace. Vliv mineralizace na průměrné hodnoty vrtného odporu (tab. 21) je i v tomto případě zanedbatelný.



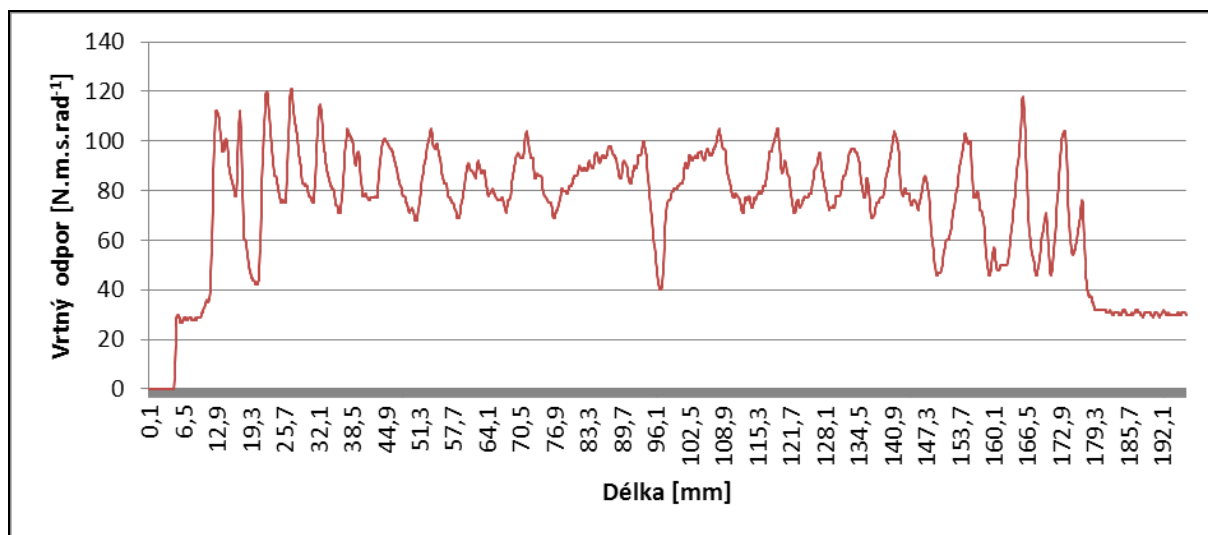
Obr. 42 Záznam měření vrtného odporu vzorku modřínu ošetřeného vodním sklem (Na_2SiO_3) po dobu 28 dnů

Tab. 20 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených vodním sklem (Na_2SiO_3)

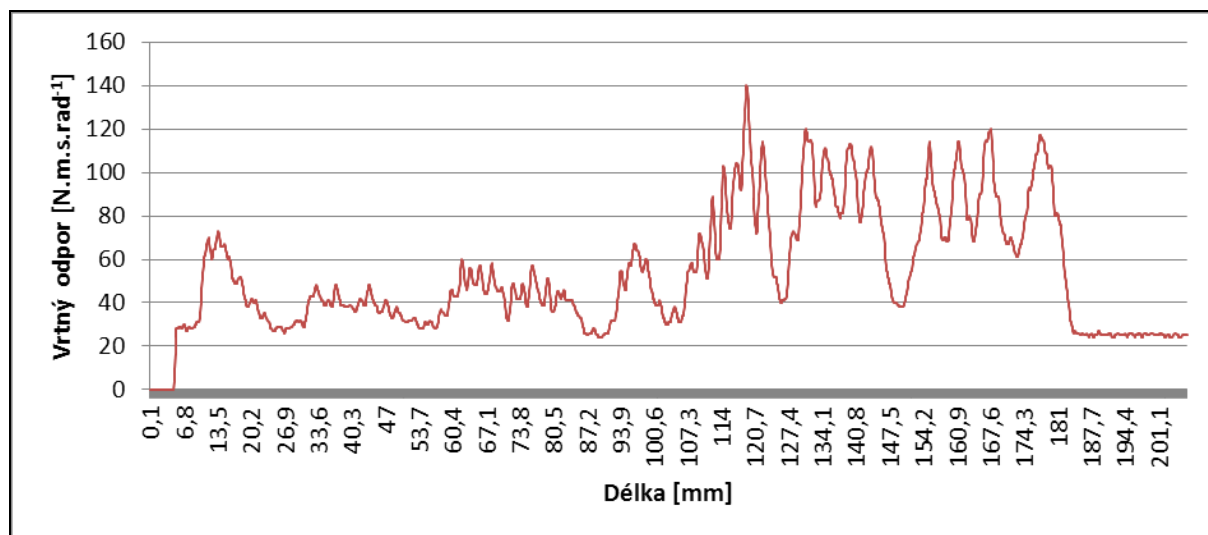
Délka máčení [den]	Vrtný odpor [100× %]			
	Modřín opadavý	Smrk ztepilý	Buk lesní	Dub
1/6	1655	1002	2096	2084
1/3	1553	938	2837	2052
1	1487	1307	2885	2140
3	1490	889	2688	1882
7	1557	885	2748	2386
14	1556	927	2770	2181
28	1520	953	2748	2072

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten ze 2 hodnot – měření v příčných a na sebe kolmých směrech.

Doplňková měření byla provedena také na původních profilech silně degradovaných dřevěných konstrukcích (viz kap 6.3) s cílem posoudit, zda aplikovaná metoda umožňuje odlišit mineralizaci materiálu od jiných typů degradace. Na základě provedených měření je nutno konstatovat, že metoda měření vrtného odporu umožňuje detekovat různé anomálie ve struktuře dřeva, jako jsou trhliny (obr. 43), suky nebo povrchová degradace (obr. 44), na základě změny vrtného odporu. Nelze však spolehlivě určit, zda degradace materiálu je způsobena mineralizací nebo jinými vlivy (povětrnostní vlivy, působení biologických škůdců, apod.). Pro potvrzení mineralizace dřeva je nutno provedení měření podpořit vhodnou analytickou metodou, jako je SEM nebo termická analýza.



Obr. 43 Záznam vrtného odporu vzorku s výsušnou trhlinou (obr. 18b)



Obr. 44 Záznam vrtného odporu povrchově degradovaného vzorku (obr. 18a)

10. VLHKOSTNÍ CHOVÁNÍ MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

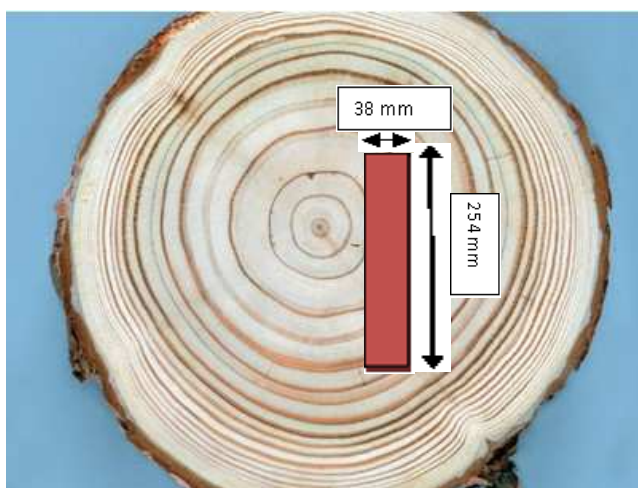
10.1 HODNOCENÍ ÚČINNOSTI HYDROFOBIZÁTORŮ TESTEM VE SWELLOMETRU

10.1.1 POSTUP ZKOUŠKY

Pro výběr vhodného hydrofobizátoru byla použita americká technická norma ASTM D4446-08 [1]. Tato norma využívá speciálního přístroje, tzv. swellometru, kde účinnost hydrofobizačního prostředku je hodnocena porovnáním přírůstku objemu ošetřeného a neošetřeného vzorku. Účelem prvotního měření swellometrem byl výběr vhodného aplikačního prostředku, přičemž byly testovány komerční chemické prostředky ve formě aplikačních roztoků viz kapitola 6.2:

- A – 1 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylosilanolát draselný) na smrku;
- B – 5 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylosilanolát draselný) na smrku;
- C – 10 % aplikační lihový roztok přípravku Lukofob ME (účinná složka metytrietyoxysilan) na smrku;
- D – 1 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylosilanolát draselný) na borovici;
- E – 5 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylosilanolát draselný) na borovici;
- F – 10 % aplikační lihový roztok přípravku Lukofob ME (účinná složka metytrietyoxysilan) na borovici;
- G – 10 %, aplikační vodný roztok přípravku Lukofob EVO (účinná složka - monomerní alkylosiloxanový ester) na borovici.

Vzorky se připravují pro tento test z mateřských desek, konkrétně borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* Karst L.), popsanych v kapitole 6.1, a vyřezaných z kmene (obr. 45). Z desky se poté vyrábějí vzorky o rozměrech 6 × 38 × 254 mm (L×R×T). Povrch vzorku musí být co nejhladší.



Obr. 45 Schéma odběru vzorků pro testování účinnosti hydrofobizátorů

Pro zkoušku jsou nutné párové vzorky, tzn. vždy dva sousední řezy tvoří pár. Jeden vzorek z páru je ošetřen prostředkem a druhý zůstává neošetřen a slouží jako referenční vzorek. Pro každý hydrofobizační prostředek byly připraveny páry vzorků z 10 různých desek (z každé desky jeden pár), celkem tedy 20 vzorků.

Aplikace prostředku byla prováděna jen máčením, přičemž před ošetřením se vzorky klimatizovaly do ustálené hmotnosti v prostředí s teplotou $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ a R. V. $50\pm 5\%$. Vzorky byly poté máčeny 30 s u prostředků na bázi ředidel a 3 min. u prostředků na bázi vody. Po vyjmutí z roztoku byly vzorky povrchově osušeny filtračním papírem, aby nedocházelo k dalšímu příjmu minerální látky. Příjem aktivní složky nebyl v tomto případě stanovován. Následně byly všechny (ošetřené i neošetřené) vzorky vloženy do klimatizační komory ($23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ a R. V. $50\pm 5\%$) na 24 h. Po vyjmutí z komory byly vzorky ponechány v laboratoři k odpaření po dobu 3 dnů a poté bylo prováděno samotné měření ve swellometru.

Swellometr byl poté společně s ošetřenými i neošetřenými vzorky umístěn do boxu naplněného destilovanou vodou s teplotou $24\pm 3^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut tak, aby byl každý vzorek plně ponořen, ale aby měřicí zařízení (číselník i kmen číselníku) zůstalo suché. Tangenciální změna rozměru vzorku vlivem bobtnání byla následně odečtena z číselníku po 30 minutové máčecí periodě.

Účelem měření je porovnání změny rozměru vzniklé bobtnáním dřeva ošetřených vzorků S_{treat} [mm] se změnou rozměru u vzorků referenčních S_{untreat} [mm] v tangenciálním směru. Relativní účinnost hydrofobizace proti bobtnání pro jednotlivé komerční přípravky AS_{relative} [%] byla vyhodnocena pomocí rovnice:

$$AS_{\text{relative}} = \frac{S_{\text{untreat}} - S_{\text{treat}}}{S_{\text{untreat}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (15)$$

10.1.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Celkem bylo testováno 7 sad vzorků, přičemž účinnost povrchové hydrofobizace byla v různém rozsahu prokázána u přípravků B, C, E, F (tab. 22).

Tab. 22: Hodnocení vhodnosti použití aplikovaných komerčních přípravků

SADA	PŘÍPRAVEK	AS_{relative} [%]
S-1	A – 1 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylsilanolát draselný) na smrku	-
S-2	B – 5 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylsilanolát draselný) na smrku	20,7
S-3	C – 10 % aplikační lihový roztok přípravku Lukofob ME (účinná složka metytrietyoxysilan) na smrku	17,14
B-1	D – 1 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylsilanolát draselný) na borovici	-
B-2	E – 5 % aplikační vodný roztok přípravku Lukofob 39 (účinná složka methylsilanolát draselný) na borovici	15,85
B-3	F – 10 % aplikační lihový roztok přípravku Lukofob ME (účinná složka metytrietyoxysilan) na borovici	13,16
B-4	G – 10 %, aplikační vodný roztok přípravku Lukofob EVO (účinná složka - monomerní alkylsiloxanový ester) na borovici	-

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z hodnot získaných pro 10 ošetřených a 10 referenčních vzorků, dle ASTM D4446-08 [1].

Z výsledků je patrné, že povrchová hydrofobizace přípravky B, C, E, F prokazatelně kladně ovlivňuje rozměrovou stabilitu dřeva. V hydrofobizovaném dřevě jsou eliminována přídavná napětí vyvolaná vlhkostními objemovými změnami. Jako nevhodné se jeví nízké koncentrace aplikačních roztoků (A a D) a hydrofobizátor na bázi alkylsiloxanových esterů, u nichž byl rozptyl natolik výrazný, že nebylo možné pozitivní efekt potvrdit.

10.2 STANOVENÍ ÚČINNOSTI PROTI BOBTNÁNÍ PŘÍPRAVKU NA BÁZI ORGANOSILANU

10.2.1 POSTUP ZKOUŠKY

Z bělového dřeva borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* Karst L.), viz kapitola 6.1, byly připraveny opět vzorky pro test bobtnání o rozměrech 6 × 38 × 254 mm (L×R×T). Pravidla pro odběr jednotlivých párů vzorků z borovice lesní a smrku ztepilého odpovídají požadavkům výše uvedené normy (viz kapitola 10.1), přičemž jeden z dvojice vzorků byl ošetřen vodným roztokem organosilanu, konkrétně přípravku Lukofob 39 (viz kapitola 6.2), a druhý zůstal neošetřen. Pro každý typ ošetření bylo použito pět párů vzorků.

Vzorky pro testy bobtnání byly nejprve klimatizovány ve vlhkostní skříni při teplotě 23±2°C a relativní vlhkosti vzduchu 50±5 % do dosažení ustálené hmotnosti $m_{\text{before-treat}}$. Hmotnost vzorků byla stanovována s přesností na 0,01 g a rozměry pro výpočet objemu vzorků V s přesností na 0,01 mm. V testu byl použit organosilanový přípravek Lukofob 39 s následujícími hmotnostními koncentracemi: $C = 1 \%$, 5% , $6,5 \%$, 10% , 33% a 100% .

Příprava testovacích vzorků je obdobná jako u testů popsanych v kapitole 10.1.1. Jednotlivé dřevěné vzorky byly ošetřeny máčením ve vodném roztoku Lukofob 39 za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa a teploty 20±1°C, s dobou máčení 3 minuty. Po vyjmutí z roztoku byly vzorky osušeny filtračním papírem tak, aby dále nedocházelo k pronikání roztoku do materiálu. U vzorků, které prošly máčením, byla stanovena vážením hmotnost po ošetření v nevysušeném stavu $m_{\text{after-treat}}$ s přesností na 0,01 g a následně byl také vypočten příjem aktivní silanolové složky Al pomocí retenčního parametru $R_{\text{Al-Volume}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] s použitím rovnice:

$$R_{\text{Al-Volume}} = \frac{m_{\text{after-treat}} - m_{\text{before-treat}}}{V} \cdot \left(C \cdot \frac{20}{10000} \right) \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (16)$$

Ošetřené i referenční vzorky byly uloženy do klimatizační komory při teplotě 23±2°C a relativní vlhkosti 50±5 % dokud obě skupiny vzorků nedosáhly ustálené hmotnosti $m_{\text{clim.-after-treat}}$ [g].

S využitím swellometru je opět hodnocen poměr změny rozměru vzniklé bobtnáním dřeva ošetřených vzorků S_{treat} [mm] a změny rozměru u vzorků referenčních S_{untreat} [mm] v tangenciálním směru. Relativní účinnost proti bobtnání pro modifikaci organosilanem AS_{relative} [%] byla vyhodnocena dle rovnice (15).

Uvedené hodnoty byly odečteny ze swellometru, který byl společně s ošetřenými i neošetřenými vzorky umístěn do boxu naplněného destilovanou vodou s teplotou 24±3°C po dobu 30 minut, a to opět tak, aby byl každý vzorek plně ponořen, ale na druhou stranu měřící zařízení (číselní i kmen číselníku) zůstalo suché.

10.2.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Objemový příjem silanolové aktivní složky AI, molekul methylsilanolátu draselného obsaženého v přípravku Lukofob 39, pro bělové vzorky borovice a smrku je uveden v tab. 23.

Tab. 23 Příjem aktivní silanolové složky AI u jednotlivých dřevin, které byly následně použity pro hodnocení účinnosti hydrofobizace proti bobtnání

Organosilan		Příjem AI	
Lukofob 39 [%]	AI [%]	Borovice lesní R _{AI-Volume} [kg·m ⁻³]	Smrk ztepilý R _{AI-Volume} [kg·m ⁻³]
1	0,2	0,42	0,46
5	1,0	1,98	2,37
6,5	1,3	2,57	3,08
10	2,0	3,94	4,64
33	6,6	9,63	14,26
100	20,0	34,97	46,68

Pozn.: Lukofob 39 obsahuje 20 % methylsilanolátu draselného. Aritmetický průměr je vypočten z 5 hodnot.

Lze konstatovat, že pro dané vzorky je příjem aktivní složky u smrku ztepilého vyšší než u borovice lesní, což ovšem nekoresponduje se závěry publikovanými v pracích autorů Siau (1988), Kurjatko a Reinprecht (1993) a dalších [25]. Tento nesoulad lze vysvětlit specifickým tvarem vzorků, konkrétně rozměrem v podélném směru (pouze 6 mm), který je přibližně jen 2krát větší než délka tracheid. Potvrzení tohoto předpokladu však vyžaduje další podrobnější experimentální výzkum.

Účinnost aplikace přípravku Lukofob 39 a jeho aktivní silanolové složky AI proti bobtnání dřeva byla zkoušena pro všechny testované koncentrace, tj. od 1 % do 100 % (tab. 24).

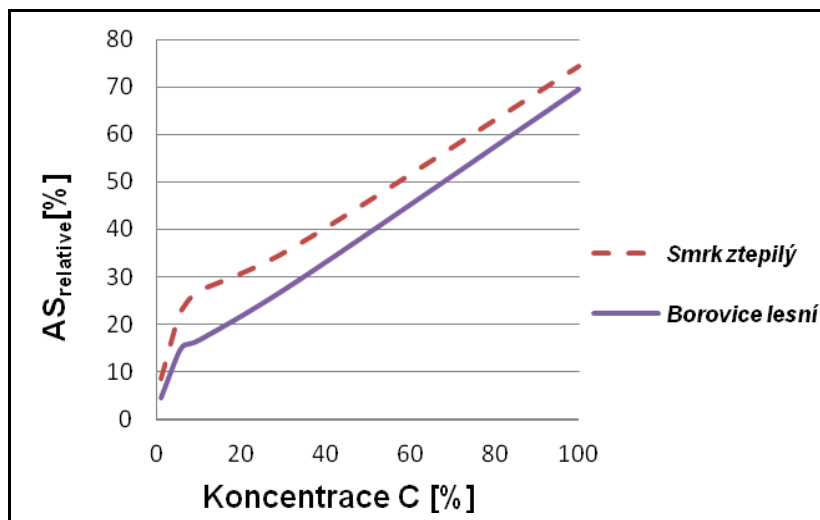
Tab. 24 Relativní účinnost proti bobtnání $AS_{relative}$ silanolové aktivní složky AI obsažené v přípravku Lukofob 39, stanovená pro vzorky borovice a smrku v tangenciálním směru

Organosilan		Test účinnosti proti bobtnání	
Lukofob 39 [%]	AI [%]	Borovice lesní AS _{relative} [%]	Smrk ztepilý AS _{relative} [%]
1	0,2	4,4 (2,2)	8,5 (4,9)
5	1	13,6 (5,9)	21,2 (4,0)
6,5	1,3	15,5 (5,2)	23,8 (3,1)
10	2	16,5 (6,7)	27,0 (8,2)
33	6,6	28,8 (5,5)	36,5 (4,3)
100	20	69,4 (3,3)	74,3 (4,0)

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 5 ošetřených a 5 referenčních vzorků, dle ASTM D4446-08 [1]. Čísla v závorkách uvádějí směrodatnou odchylku.

Jak ukazuje graf na obr. 46, tangenciální bobtnání u obou testovaných dřevin úměrně klesá neboli hodnota relativní účinnosti proti bobtnání $AS_{relative}$ úměrně roste s rostoucím množstvím přípravku v dřevěných vzorcích. Závislost relativní účinnosti proti bobtnání

$AS_{relative}$ na koncentraci roztoku C má přibližně lineární charakter, který lze vyjádřit pro borovici lesní rovnicí ve tvaru $AS_{relative} = 0,6072 \cdot C + 8,9626$ s koeficientem determinance $R^2 = 0,9857$ a pro smrk ztepilý $AS_{relative} = 0,5839 \cdot C + 16,739$ s $R^2 = 0,9569$. Při 100 % koncentraci bylo dosaženo účinnosti proti bobtnání větší než 65 % pro obě použité dřeviny, borovici lesní a smrk ztepilý.



Obr. 46 Závislost relativní účinnosti přípravku Lukofob 39 proti bobtnání $AS_{relative}$ u vzorků borovice lesní a smrku ztepilého na koncentraci použitého roztoku

10.3 DALŠÍ EXPERIMENTY SOUVISEJÍCÍ S VLHKOSTNÍM CHOVÁNÍM DŘEVA

Pro hydrofobizaci dřeva v současné době není k dispozici žádná česká nebo evropská technická norma. Pro ověření funkčnosti vodou ředitelného hydrofobizačního prostředku Lukofob 39 proti bobtnání dřeva (viz kapitola 6.2), byl prováděn i soubor dalších zkoušek, a to v několika experimentálních fázích:

- fáze č. 1 – hodnocení úhlu smáčení vodou na povrchu hydrofobizovaného dřeva;
- fáze č. 2 – aplikace prostředku na starém dřevě bez umělého vysušení;
- fáze č. 3 – aplikace prostředku na vzorcích lepeného lamelového dřeva;
- fáze č. 4 – aplikace prostředku na vzorcích smrku a břízy s předchozím umělým vysušením.

10.3.1 POSTUP EXPERIMENTŮ

Experimentální fáze 1 – hodnocení úhlu smáčení vodou na povrchu hydrofobizovaného dřeva

V první fázi bylo použito smrkové dřevo (*Picea abies* L.) ošetřené nátěrem hydrofobizátoru na bázi organosilanu (Lukofob 39) pro hodnocení smáčecího úhlu kapky vody na povrchu prvku mineralizovaného dřeva (viz kapitoly 6.1 a 6.2). K tomuto účelu byl využit snímek pořízený digitálním fotoaparátem a vyhodnocený pomocí programu pro zpracování a analýzu obrazu LUCIA DI.

Experimentální fáze 2 – aplikace prostředku na starém dřevě bez umělého vysušení

Experiment č. 2 byl zaměřen na hydrofobizaci starého dřeva. Celkem byly připraveny 2 sady vzorků (každá sada po 7 vzorcích) z tesaných smrkových, uměle nevysušených konstrukčních profilů z krovu hospodářské budovy (viz kapitola 6.3). Vzhledem k charakteru experimentu nebyly odběry provedeny ve statisticky průkazném množství. První sada vzorků byla ošetřena hydrofobizátorem Lukofob 39 po celém povrchu vzorku nátěrem a bez stanovení příjmu aktivní složky, druhá sada vzorků nebyla ošetřena. Ošetřené i neošetřené (referenční) vzorky starého dřeva byly cyklicky zatěžovány vlhkostí a vysýcháním. Hodnoty vlhkosti dřeva odpovídaly třídě použití 2 – 3 dle ČSN EN 335 [4].

Experiment byl realizován ve třech krocích:

- V 1. kroku byly zkušební vzorky uloženy ve vlhkostní skříni po dobu 14 dnů s teplotou prostředí v rozmezí 24 – 30 °C a relativní vlhkostí vzduchu 83 – 95 %. Vzorky nebyly v kontaktu s vodou. Toto prostředí odpovídá třídě použití 2 dle ČSN EN 335 [4].
- V 2. kroku byly vzorky vyjmuty z vlhkostní skříně a uloženy po dobu 14 dnů v laboratorním prostředí s teplotou 23°C±2 °C a R. V. 50±5 %.
- Ve 3. kroku pak byly vzorky opět uloženy do vlhkostní skříně po dobu 14 dnů, kde byly vystaveny účinkům prostředí s teplotou v rozmezí 24 – 30 °C a relativní vlhkostí vzduchu 83 – 95 %, přičemž vzorky se svým povrchem lehce dotýkaly ustálené vodní hladiny. Toto prostředí odpovídá třídě použití 3 dle ČSN EN 335 [4].

Průběžně byl ověřován nárůst vlhkosti vzorků. Po ukončení každého cyklu byla u vzorků zaznamenána konečná vlhkost, hmotnost s přesností na 0,1 g a rozměry každého vzorku s přesností na 0,01 mm. U vzorků byl vyhodnocen především nárůst vlhkosti a dále byla vizuálně sledována přítomnost plísní. Vlhkost dřeva byla měřena elektrickým odporovým vlhkoměrem s přesností na 0,1 %.

Experimentální fáze 3 – aplikace prostředku na vzorcích lepeného lamelového dřeva

Experiment č. 3 byl prováděn na konstrukčních profilech z lepeného lamelového dřeva. Vzorky s rozměry 160 × 160 × 200 mm byly vyrobeny z LLD třídy pevnosti GL32h (viz kapitola 6.1).

Vzorky ošetřené nátěrem přípravku Lukofob 39 a neošetřené (referenční) vzorky LLD byly cyklicky zatěžovány vlhkostí a vysýcháním, stejně jako v předchozí experimentální fázi 2 a obdobně i vyhodnoceny.

Experimentální fáze 4 – aplikace prostředku na vzorcích smrku a břízy s předchozím umělým vysušením

Ve čtvrté etapě experimentů byla zkoumána účinnost hydrofobizátorů u vzorků smrku a břízy (viz kapitola 6.1), které byly před aplikací látky uměle vysušeny a zváženy s přesností na 0,1 g. Vzorky ze smrku i břízy byly odebrány v rozměrech 200 × 30 × 50 mm (L×R×T), přičemž z každé dřeviny bylo připraveno 40 vzorků jádrového a 40 vzorků bělového dřeva. Vzorky byly ošetřeny nátěrem nebo máčením (obr. 47) ve vodného roztoku hydrofobizátoru

Lukofob 39 s různými koncentracemi roztoku (tab. 25). Příjem účinné složky nebyl pro daný experiment stanovován. Zjišťovány byly především váhové přírůstky zkušebních těles během vlhkostního zatěžování. Sledován byl také výskyt případných plísní.



Obr. 47: Experimentální fáze č. 4 – aplikace roztoku hydrofobizátoru máčením

Tab. 25: Označení vzorků testovaných ve 4. experimentální fázi

	Dřevo z břízy		Dřevo ze smrku	
	Bělové	Jádrové	Bělové	Jádrové
Bez ošetření - referenční	BB-R	BJ-R	SB-R	SJ-R
Nátěr 5 % roztokem hydrofobizátoru	BB-NK1	BJ-NK1	SB-NK1	SJ-NK1
Nátěr 10 % roztokem hydrofobizátoru	BB-NK2	BJ-NK2	SB-NK2	SJ-NK2
Máčení v 5 % roztoku hydrofobizátoru	BB-MK1	BJ-MK1	SB-MK1	SJ-MK1
Máčení v 10 % roztoku hydrofobizátoru	BB-MK2	BJ-MK2	SB-MK2	SJ-MK2

Experiment byl realizován ve třech krocích:

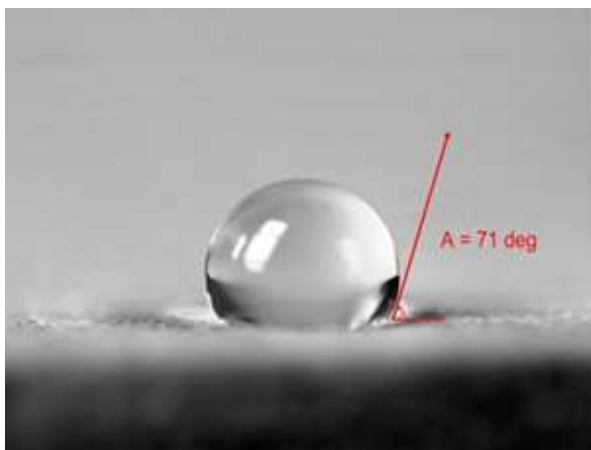
- V 1. kroku byly vzorky uloženy ve vlhkostní skříni po dobu 14 dnů s teplotou v rozmezí 24 – 30°C a relativní vlhkostí vzduchu 83 – 95 %. Vzorky nebyly v kontaktu s vodou. Toto prostředí odpovídá třídě použití 2 dle ČSN EN 335 [4].
- Ve 2. kroku byly vzorky vyjmuty z vlhkostní skříně a uloženy po dobu 14 dnů v laboratorním prostředí s teplotou 23°C±2 °C a R. V. 50±5 %.
- V 3. kroku byly vzorky nejprve na 24 hodin ponořeny do vody a následně uloženy do vlhkostní skříně po dobu 18 dnů, kde byly vystaveny účinkům prostředí s teplotou v rozmezí 24 – 30°C a relativní vlhkosti vzduchu 83 – 95 %. Toto prostředí odpovídá třídě použití 3 dle ČSN EN 335 [4].

Průběžně byl kontrolován váhový přírůstek s přesností na 0,1 g u třech vzorků z každé skupiny, přičemž na konci zkoušky byly zváženy všechny vzorky.

10.3.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Výsledky experimentální fáze 1 – hodnocení úhlu smáčení vodou na povrchu hydrofobizovaného dřeva

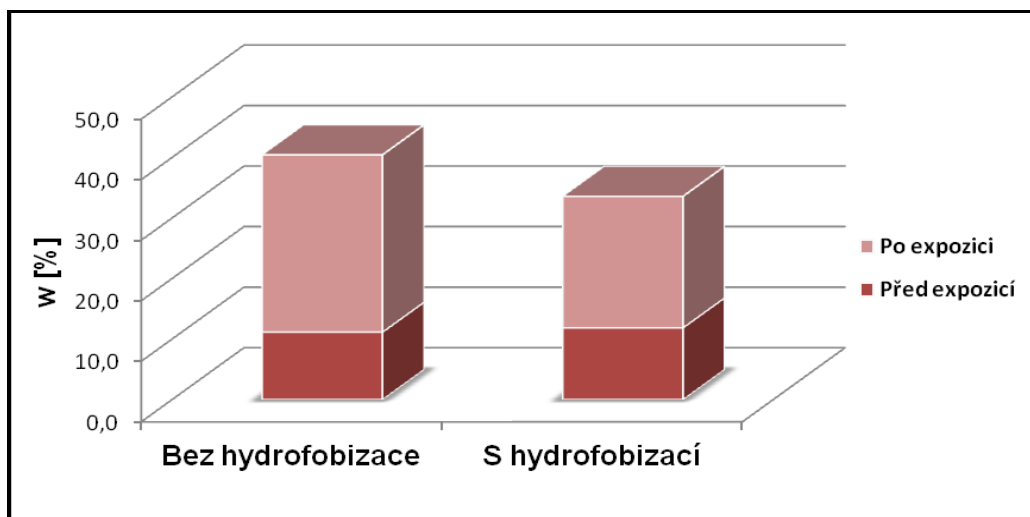
Smáčecí úhel kapky vody, stanovený analýzou obrazu v programu LUCIA DI, má hodnotu 109° (obr. 48).



Obr. 48: Stanovení smáčecího úhlu pro vodu na hydrofobizovaném povrchu analýzou obrazu pořízeného fotoaparátem s makroobjektivem ($180^\circ - 71^\circ = 109^\circ$)

Výsledky experimentální fáze 2 – aplikace prostředku na starém dřevě bez umělého vysušení

Po provedení 1. kroku bylo zjištěno, že při expozici vzorků v druhé třídě použití se hodnoty vlhkosti u hydrofobizovaných i nehdrofobizovaných vzorků výrazně neliší. Tyto výsledky potvrzují předpoklad, že příjem vzdušné vlhkosti není hydrofobizací zásadně ovlivněn. Naopak při expozici vzorků ve 3. třídě použití (3. krok) nabývá vlhkost u obou sad vzorků odlišných hodnot (obr. 49), konkrétně u nehdrofobizovaných vzorků 29,3 % se směrodatnou odchylkou 9,3 % a u hydrofobizovaných 21,7 % se směrodatnou odchylkou 1,5 %. Uvedený rozdíl je způsoben nižším příjmem vody v kapalném stavu u vzorků s hydrofobizační úpravou. Zároveň v průběhu 3. kroku došlo k růstu plísni na povrchu neošetřených vzorků (obr. 50).



Obr. 49: Experimentální fáze č. 2 – změny vlhkosti u hydrofobizovaných i nehydrofobizovaných vzorků starého smrkového dřeva ve 3. kroku experimentu – při expozici ve 3. třídě použití (průměrné hodnoty stanovené vždy na 7 vzorcích)



Obr. 50: Experimentální fáze č. 2 – na povrchu neošetřených vzorků (vlevo) dochází k rozvoji růstu plísní

Výsledky experimentální fáze 3 – aplikace prostředku na vzorcích lepeného lamelového dřeva

Tento experiment byl také vyhodnocen po ukončení 2. kroku. U referenčních (neošetřených) vzorků z lepeného lamelového dřeva se lamely, jež byly v bezprostředním kontaktu s vodní hladinou, zcela nasýtily vodou (obr. 51b), avšak lepená spára mezi jednotlivými lamelami tvoří účinnou bariéru pro pohyb vody volné. U hydrofobizovaných vzorků nebyl tento efekt pozorován, neboť voda nepronikla významně do povrchu hydrofobizovaného dřeva (obr. 51a).

Vlhkost vzorků ošetřených a neošetřených se lišila pouze nepatrně (kromě lamel, dotýkajících se vodní hladiny). Rozdíl hodnot činil průměrně 1 – 2 %, což lze vysvětlit jednak relativně velkým poměrem objemu vzorku k jeho povrchu, jednak existencí zmíněných lepených spár. Plíseň se neobjevila na žádném ze vzorků.



a)

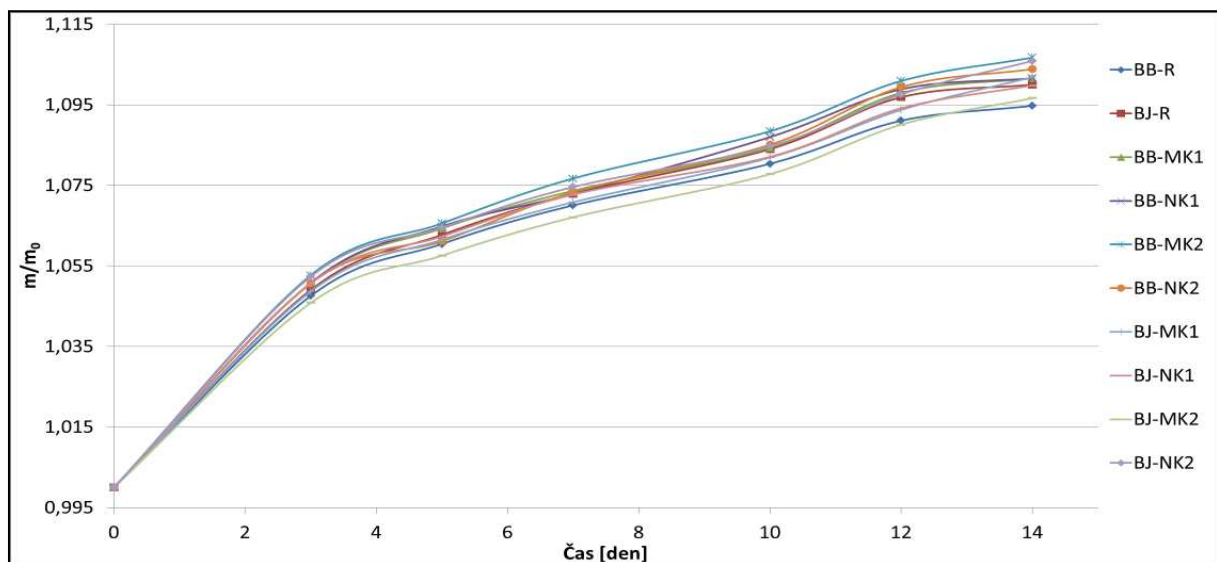
b)

Obr. 51: Vzorky LLD po provedení 3. experimentální fáze: a – hydrofobizovaný vzorek bez opticky viditelných vlhkostních stop; b – nehydrofobizovaný vzorek se zřetelným nasycením kontaktní lamely vodou (lamela vyznačena červeně)

Výsledky experimentální fáze 4 – aplikace prostředku na vzorcích smrku a břízy s předchozím umělým vysušením

Ve čtvrté fázi experimentů byla zkoumána účinnost hydrofobizátorů u vzorků smrku a břízy, které byly před aplikací látky uměle vysušeny.

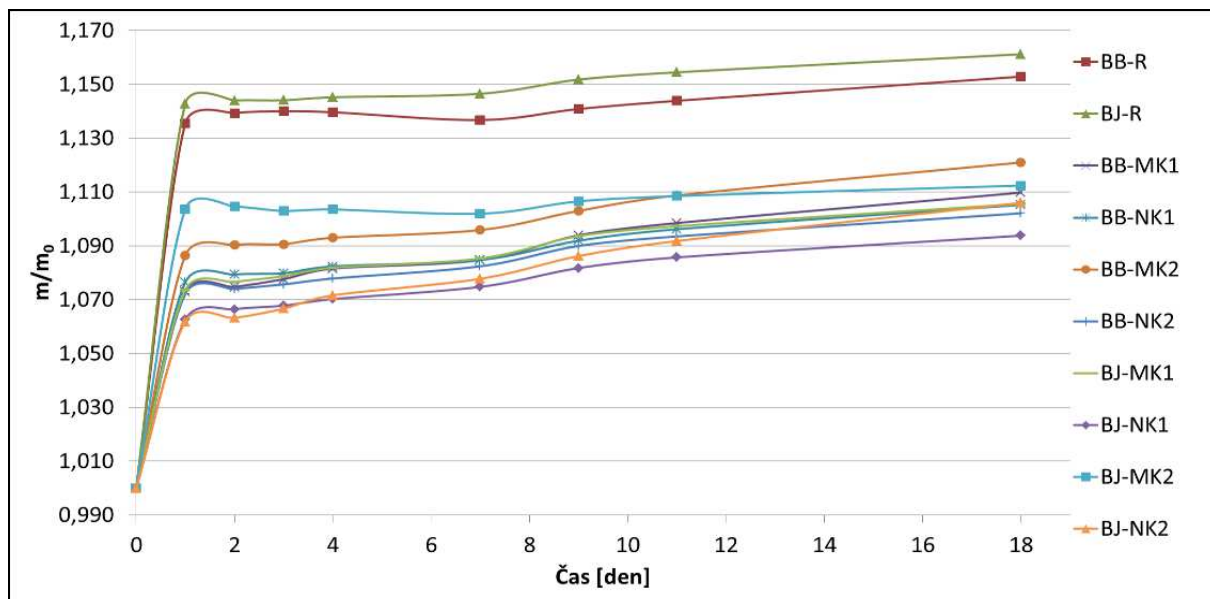
Získané výsledky se týkaly především průběžně stanovovaných hmotnostních přírůstků vzorků. Dynamika příjmu vlhkosti pro dřevo břízy v 1. a 3. kroku je graficky znázorněna na obr. 52 a 53.



Obr. 52: Experimentální fáze č. 4 – dynamika příjmu vlhkosti u vzorků břízy v 1. kroku – 2. třídě použití (označení vzorků viz tab. 25)

Na obr. 52 je patrné, že všechny skupiny vzorků přijímaly ve 2. třídě použití vzdušnou vlhkost bez ohledu na druh ošetření a koncentraci roztoku. Tento efekt byl předpokládán,

jelikož hydrofobizátor brání zejména příjmu vody v kapalném stavu. Na obr. 53, popisujícím expozici ve 3. třídě použití, je již vidět rozdíl mezi příjmem referenčních (neošetřených) a ošetřených vzorků, přičemž rozdíl mezi jednotlivými aplikačními technologiemi a ředěním koncentráту byl minimální.



Obr. 53: Experimentální fáze č. 4 – dynamika příjmu vlhkosti u vzorků z břízy v 3. kroku – 3. třídě použití (označení vzorků viz tab. 25)

Během zkoušky, ani na jejím konci nebyl zjištěn výskyt plísňe vzorků. Pravděpodobným důvodem je primární ošetření dřeva umělým vysušením, kdy došlo k likvidaci spór hub a plísní.

11. ODOLNOST MINERALIZOVANÉHO DŘEVA PROTI BIOLOGICKÝM ČINITELŮM

11.1 STANOVENÍ ODOLNOSTI MINERALIZOVANÉHO DŘEVA PROTI DŘEVOKAZNÝM HOUBÁM

11.1.1 POSTUP ZKOUŠKY

Z bělového dřeva borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (viz kapitola 6.1) byly vyrobeny vzorky 25 × 25 × 3 mm (L×R×T) pro test dřevokazných hub. Vzorky byly nejprve po dobu 6 hodin sterilizovány při teplotě 103±2 °C a poté uloženy ve sterilní vlhkostní skříni při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50±5 % do dosažení ustálené hmotnosti $m_{before-treat}$. Hmotnost vzorků byla stanovována s přesností na 0,01 g a rozměry pro výpočet povrchu vzorků (*Surface*) s přesností na 0,01 mm. V testu byl použit organosilan Lukofob 39 (viz kapitola 6.2), ve formě vodou ředitelných roztoků s následujícími koncentracemi: C = 6,5 %, 10 %, 33 % a 100 %.

Jednotlivé dřevěné vzorky byly poté ošetřeny máčením ve vodném roztoku prostředku Lukofob 39 za atmosférického tlaku \cong 100 kPa, teploty 20±1°C, a doby máčení 3 minuty. Přebytek kapaliny z povrchu vzorku byl opatrně odstraněn filtračním papírem. U vzorků, které prošly máčením, byla vážením stanovena hmotnost po ošetření v nevysušeném stavu $m_{after-treat}$ s přesností na 0,01 g a vypočten příjem aktivní silanolové složky Al pomocí retenčního parametru $R_{Al-Surface}$ [g·m⁻²] s použitím rovnice:

$$R_{Al-Surface} = \frac{m_{after-treat} - m_{before-treat}}{Surface} \cdot \left(C \cdot \frac{20}{10000} \right) \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (17)$$

Ošetřené i referenční neošetřené vzorky byly uloženy v klimatické komoře při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti 50±5 % po dobu přibližně 4 týdnů dokud nedosáhly ustálené hmotnosti $m_{clim-after-treat}$ [g].

Na takto připravených vzorcích bělového dřeva borovice lesní ošetřených organosilanem byla testována odolnost proti dřevokazným houbám, konkrétně proti dvěma houbám ze skupiny hnědé hniloby *Coniophora puteana* (Schumacher) P. Karsten a *Serpula lacrymans* (Wulfen) J. Schröt, a jedné houbě ze skupiny bílé hniloby *Trametes versicolor* (L.) Pilát [Synonym: *Coriolus versicolor* (Linnaeus) Quélet]. Testování odolnosti proti dřevokazným houbám bylo provedeno podle technické normy ČSN EN 113 [2] s následujícími modifikacemi:

- použití vzorků menších rozměrů (25 × 25 × 3 mm), místo vzorků s rozměry 50 × 25 × 15 mm (L×R×T);
- ošetření vzorků máčením namísto aplikace vakuové impregnace;
- použití kratšího času testování (umístění v inkubátoru) podle Chittenden a Singh [48], jehož doba je pouze 6 týdnů namísto obvyklých 16 týdnů;
- expozice vzorků v Petriho miskách s průměrem 100 mm namísto Kolleho baněk s objemem 1 litr.

Po šesti týdnech byly vzorky vyjmuty z inkubátoru, opatrně očištěny od vzniklých mycelií a následně jemně sušeny na vzduchu po dobu 3 – 4 dnů. Poté byly vzorky znovu uloženy v klimatické komoře při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50±5 % přibližně po dobu 4 týdnů dokud nedosáhly ustálené hmotnosti $m_{\text{clim-decayed}}$ [g]. Vyhodnocení testu odolnosti proti dřevokazným houbám bylo provedeno na základě stanovení hmotnostních ztrát vzorků Δm [%] pomocí rovnice:

$$\Delta m = \frac{m_{\text{clim-after-treat}} - m_{\text{clim-decayed}}}{m_{\text{clim-after-treat}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (18)$$

Veškeré testy hodnotící odolnost ošetřeného dřeva proti dřevokazným houbám byly realizovány na Technické univerzitě ve Zvoleně, Drevárské fakultě.

11.1.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Plošný příjem silanolové aktivní složky AI v přípravku Lukofob 39 pro bělové vzorky borovice a smrku je uveden v tab. 26.

Tab. 26 Příjem aktivní silanolové složky AI u vzorků borovice lesní, které byly následně použity pro hodnocení odolnosti proti dřevokazným houbám

Organosilan		Příjem AI
Lukofob 39 [%]	AI [%]	Borovice lesní $R_{\text{AI-Surface}}$ [g·m ⁻²]
6,5	1,3	0,73
10	2,0	1,44
33	6,6	6,86
100	20,0	25,60

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 5 hodnot.

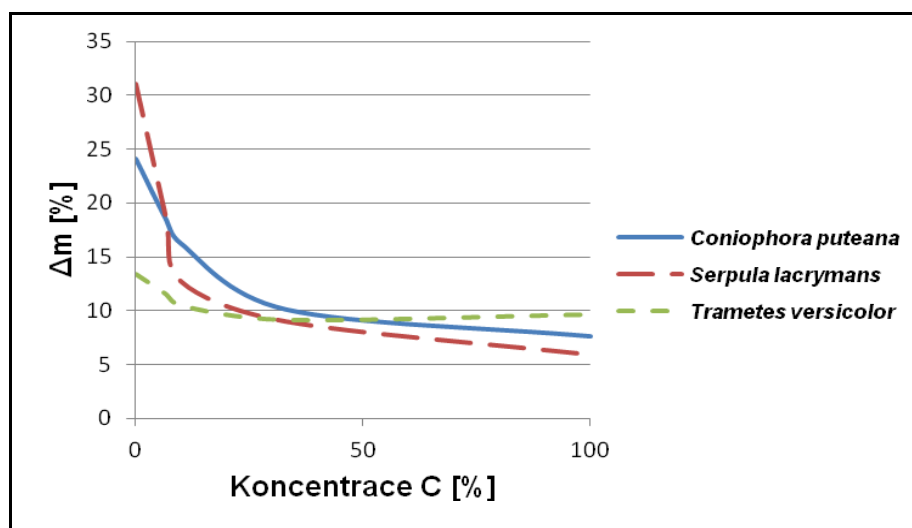
Aplikace prostředku Lukofob 39 evidentně zvyšuje odolnost proti dřevokazným houbám u vzorků dřeva borovice lesní (tab. 27, obr. 54 a obr. 55). Hmotnostní ztráty vzorků ošetřených organosilanem klesají s rostoucím množstvím aktivní silanolové složky AI. Lze také předpokládat, že účinnost přípravku Lukofob 39 proti dřevokazným houbám je dána také poměrně vysokými hodnotami pH roztoku (při 100 % koncentraci pH 13,5, při 6,5 % koncentraci pH 12), případně přítomností dalších výrobcem přesně nedefinovaných aditiv.

Tab. 27 Hmotnostní ztráty vzorků z borovicové běle ošetřené přípravkem Lukofob 39 po ataku dřevokazných hub – *Coniophora puteana*, *Serpula lacrymans* a *Trametes versicolor*

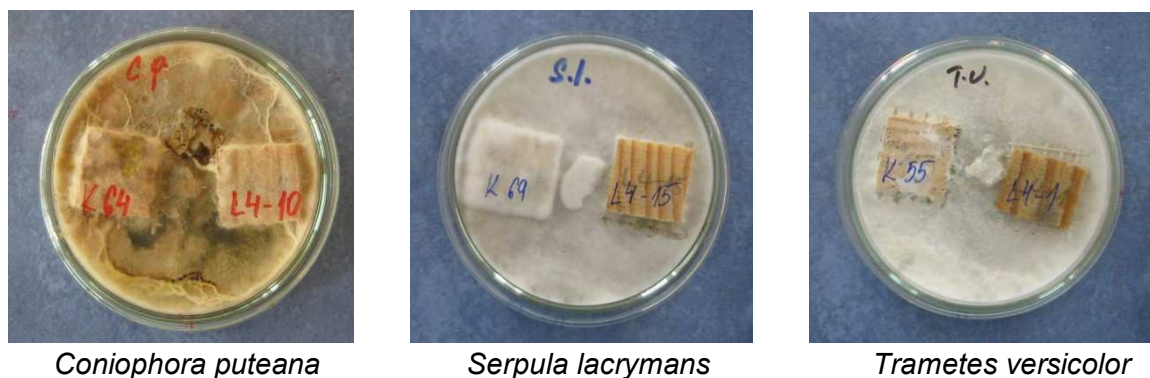
Organosilan		Test dřevokazných hub – hmotnostní ztráty [%]		
Lukofob 39 [%]	AI [%]	<i>Coniophora puteana</i>	<i>Serpula lacrymans</i>	<i>Trametes versicolor</i>
Reference	-	24,1 (4,4)	31,1 (6,7)	13,4 (3,7)
6,5	1,3	18,6 (3,9)	18,9 (3,2)	11,6 (1,9)
10,0	2,0	16,2 (4,4)	12,7 (3,0)	10,5 (1,8)
33,0	6,6	10,1 (2,4)	9,0 (3,0)	9,2 (2,3)
100	20	7,6 (1,2)	5,9 (2,4)	9,7 (1,1)

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 5 vzorků pro ošetřené sady a 20 vzorků pro sadu referenční. Čísla v závorkách uvádějí směrodatnou odchylku.

Výraznější účinek má Lukofob 39 proti dřevokazným houbám ze skupiny hnědé hniloby, konkrétně *Serpula lacrymans* a *Coniophora puteana*, a méně výrazný účinek je pozorován pro skupinu hub bílé hniloby, konkrétně *Trametes versicolor* (tab. 27, obr. 54). Toto zjištění potvrzuje také exponenciální korelace mezi hmotnostní ztrátou Δm degradovaných vzorků a rostoucí koncentrací C roztoku přípravku Lukofob 39 v rozsahu od 0 do 100 %. Tato korelace byla poměrně těsná, jak ukazují korelační koeficienty R , tj. pro *S. lacrymans* $\Delta m = e^{(3,37 - 0,058 \cdot C)}$, $R = 0,90$; pro *C. puteana* $\Delta m = e^{(3,06 - 0,016 \cdot C)}$, $R = 0,91$; a pro *T. versicolor* $\Delta m = e^{(2,46 - 0,003 \cdot C)}$, $R = 0,65$.



Obr. 54 Hmotnostní ztráty Δm vzorků z borovicové běle při testu odolnosti proti dřevokazným houbám klesají s rostoucí koncentrací přípravku Lukofob 39



Obr. 55 Silný útok hub na referenčních vzorcích z borového bělového dřeva (vzorky K uložené v miskách vlevo) a omezení útoku hub na vzorcích ošetřených přípravkem Lukofob 39 v koncentraci 100 % (vzorky L4 uložené v miskách vpravo) – stav po 6 týdnech expozice

11.2 STANOVENÍ ODOLNOSTI MINERALIZOVANÉHO DŘEVA PROTI PLÍSNÍM

11.2.1 POSTUP ZKOUŠKY

Z výpočet povrchu vzorků (*Surface*) s přesností na 0,01 mm. V testu byl opět použit organosilan Lukofob 39 (viz kapitola 6.2) ve formě vodou ředitelných roztoků s následujícími koncentracemi bělového dřeva borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (viz kapitola 6.1), byly připraveny malé zkušební vzorky o rozměrech 50 × 10 × 5 mm (L×R×T) pro test plísní. Vzorky byly nejprve po dobu 6 hodin sterilizovány při teplotě 103±2 °C, a poté uloženy ve sterilní vlhkostní skříní při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50±5 % do dosažení ustálené hmotnosti $m_{before-treat}$. Hmotnost vzorků byla stanovována s přesností na 0,01 g a rozměry pro : C = 6,5 %, 10 %, 33 % a 100 %.

Jednotlivé vzorky byly poté ošetřeny máčením ve vodném roztoku prostředku Lukofob 39 za atmosférického tlaku \cong 100 kPa, teploty 20±1°C, a doby máčení 3 minuty. Po vyjmutí z roztoku byl přebytek kapaliny opatrně odstraněn z povrchu filtračním papírem a následně byla stanovena vážením hmotnost po ošetření v nevysušeném stavu $m_{after-treat}$ s přesností na 0,01 g pro výpočet příjmu aktivní silanolové složky Al pomocí retenčního parametru $R_{Al-Surface}$ [g·m⁻²] s použitím rovnice (17).

Ošetřené i referenční neošetřené vzorky byly uloženy v klimatické komoře při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti 50±5 % po dobu přibližně 4 týdnů dokud nedosáhly ustálené hmotnosti $m_{clim-after-treat}$ [g].

Na připravených vzorcích ošetřených organosilanem byla následně stanovována odolnost proti plísním, konkrétně *Aspergillus niger* Tiegh. a *Penicillium* sp., podle technické normy ČSN EN 15457 [11] s některými modifikacemi ve sterilizačním procesu a tvaru vzorků. Vzorky byly sterilizovány UV zářením, umístěny do Petriho misek s průměrem 100 mm (vždy dva vzorky v jedné misce vyplněné 3 – 4 mm silnou vrstvou agaru) a poté byly naočkovány vodnou suspenzí obsahující spóry testovaných plísní.

Následně proběhla inkubace vzorků při teplotě 24±2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 90 – 95 % trvajících 4 týdny. Odolnost proti plísním byla u jednotlivých vzorků vizuálně hodnocena na základě vzhledu jejich horní plochy 50x10 mm po 7, 14, 21 a 28 dnech, s použitím stupnice plísňové aktivity MA od 0 do 4, tzn. 0 = bez plísní; 1 = výskyt plísní do 10 %; 2 = výskyt plísní do 30 %; 3 = výskyt plísní do 50 %; 4 = výskyt plísní více než 50 % z povrchu vzorku.

Testy hodnotící odolnost ošetřeného dřeva proti plísním byly realizovány na Technické univerzitě ve Zvoleně, Dřevářské fakultě.

11.2.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Plošný příjem silanolové aktivní složky Al v přípravku Lukofob 39 pro bělové vzorky borovice a smrku je uveden v tab. 28.

Tab. 28 Příjem aktivní silanolové složky Al u vzorků borovice lesní, které byly následně použity pro hodnocení odolnosti proti plísním

Organosilan Lukofob 39 [%]		Al [%]	Příjem Al Borovice lesní $R_{Al-Surface}$ [g·m ⁻²]
6,5		1,3	0,88
10		2,0	1,60
33		6,6	7,85
100		20,0	31,54

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 6 hodnot.

Odolnost proti plísním byla u vzorků bělového dřeva borovice, ošetřených organosilanem, vyšší než u vzorků referenčních (tab. 29, obr. 56 a obr. 57). Rozdíl v intenzitě napadení dřeva plísněmi druhu *Aspergillus niger* a *Penicillium* sp. byl výrazný během prvního týdne. Rozdíl byl pozorován až do třetího týdne, avšak již ne tak velký. Po čtyřech týdnech expozice byly povrchy vzorků již zřetelně pokryty mycelií obou druhů plísní.

Tab. 29 Napadení plísní u vzorků z borovicové běle ošetřených přípravkem Lukofob 39

Organosilan Lukofob 39 [%]	Al [%]	Test proti plísním – atak plísní po 7 až 28 dnech [0-4]							
		<i>Aspergillus niger</i>				<i>Penicillium</i> sp.			
		7	14	21	28	7	14	21	28
Reference	-	4	4	4	4	4	4	4	4
6,5	1,3	0	1,67	2,33	3	3	4	4	4
10,0	2,0	0	1,5	2,5	2,67	2	2,5	3,17	3,5
33,0	6,6	0	1,17	2,17	2,67	1	1,83	2,67	3,17
100	20	0	0,83	1,17	2,33	0	0,17	0,33	1,17

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 6 hodnoty ošetřených i kontrolních vzorků.

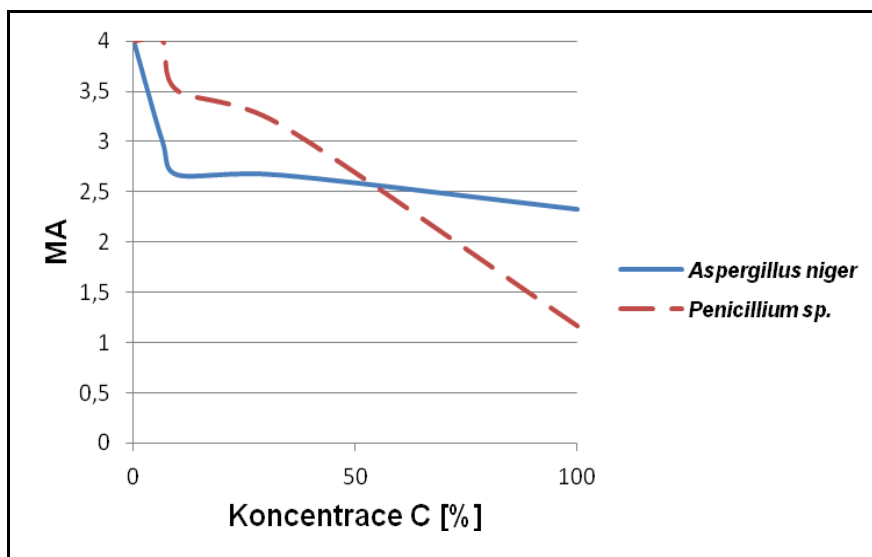


Aspergillus niger



Penicillium sp.

Obr. 56 Silná forma plísňového ataku na referenčním vzorku z borového bělového dřeva (vzorky K uložené v miskách vpravo) a částečně potlačený atak plísní u vzorků ošetřeného organosilanem při použití 100 % koncentrace přípravku Lukofob 39 (vzorky L4 uložené v miskách vlevo) - obrázky z finálního 28. dne expozice



Obr. 57 Rozsah plísňových ataků MA u vzorků z borovicové běle klesal s rostoucí koncentrací přípravku Lukofob 39 - výsledky z finálního 28. dne

Pouze při použití nejvyšší 100 % koncentrace přípravku Lukofob 39 dřevěný povrch výrazně vzdoroval druhu *Penicillium sp.* Protiplísňový účinek tohoto přípravku lze vysvětlit nejen přítomností jeho molekul v povrchu dřevěných vzorků, ale i jeho vysokým pH, jehož hodnota je 13,5 pro 100 % roztok a 12 pro 6,5 % roztok přípravku Lukofob 39.

12. MECHANICKÉ PARAMETRY MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

12.1 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU PODÉL VLÁKEN MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

12.1.1 POSTUP ZKOUŠKY

V první řadě byla pro zkoušku pevnosti dřeva v tlaku vyrobena zkušební tělesa s rozměry 30 × 20 × 20 mm (L × R × T) dle ČSN 490110 [12] ze smrku ztepilého (*Picea abies* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Quercus* SPP.) (viz kapitola 6.1). Tělesa byla nejprve umístěna do klimatické komory s teplotou 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 70 ± 5 %, dokud nedosáhla ustálené hmotnosti $m_{\text{before-treat}}$. Vážení zkušebních těles bylo provedeno s přesností na 0,01 g. Následně byly změřeny rozměry těles s přesností na 0,01 mm. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet objemu V jednotlivých zkušebních těles.

Pro ošetření dřevěných vzorků byl použit opět přípravek Lukofob 39 (viz kapitola 6.2), jako 50 % vodný roztok. Tělesa byla ošetřena máčením za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa, teploty 20 ± 1 °C, a doby máčení 1/24, 1/6, 1/3, 1, 3, 7, 14, a 28 dnů (pro jehličnaté dřeviny), resp. 1/6, 1, 7, a 28 dnů (pro listnaté dřeviny). Poté byly z povrchu těles odstraněny zbytky roztoku filtračním papírem. Příjem aktivní složky roztoku $R_{\text{Al-Volume}}$ [kg · m⁻³] byl následně spočítán dle vzorce (19) pro jednotlivá tělesa, pro něž byla stanovena i hmotnost ve vlhkém stavu $m_{\text{after-treat}}$ s přesností 0,01 g:

$$R_{\text{Al-Volume}} = \frac{m_{\text{after-treat}} - m_{\text{before-treat}}}{V} \cdot \left(50 \cdot \frac{20}{10000} \right) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (19)$$

Ošetřená i referenční neošetřená tělesa byla uložena v klimatické komoře při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 70 ± 5 % dokud nedosáhla ustálené hmotnosti.

Testování pevnosti v tlaku dřeva podél vláken bylo prováděno dle ČSN 490110 [12]. Tato technická norma je primárně určena pro zkoušení listnatých dřevin. Podstatou zkoušky je zjištění maximálního zatížení při porušení zkušebního tělesa v tlaku a výpočet napětí při tomto zatížení. Pro zkoušku je potřeba soubor minimálně 30 těles. Tělesa byla do lisu umístěna tak, aby byla zatěžována na radiálním řezu (obr. 58), přičemž rozměry těles a , b byly stanoveny s přesností na 0,01 mm. Těleso bylo rovnoměrně zatěžováno s rychlostí zvolenou tak, aby porušení nastalo v čase 60 (±30) s. Po ukončení zkoušky bylo maximální zatížení F_{max} odečteno s přesností 1 %. Pevnost v tlaku ve směru vláken při konkrétní vlhkosti σ_w [MPa] v době zkoušky byla vypočtena dle rovnice (20) s přesností na 0,5 MPa:

$$\sigma_w = \frac{F_{\text{max}}}{a \cdot b} \quad [\text{MPa}] \quad (20)$$



Obr. 58 Stanovení pevnosti dřeva v tlaku podél vláken u malých bezvadých vzorků

Poté bylo provedeno stanovení vlhkosti dřeva w [%] vážením celých těles dle ČSN EN 13183-1 [9]. Vypočtenou pevnost lze na základě opravného koeficientu α ($\alpha = 0,04$ pro všechny dřeviny) následně přepočítat na pevnost při 12 % vlhkosti σ_{12} [MPa] pomocí rovnice (21) s přesností na 0,5 MPa:

$$\sigma_{12} = \sigma_w \cdot (1 + \alpha \cdot (w - 12)) \quad [\text{MPa}] \quad (21)$$

12.1.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Objemový příjem aktivní složky silanolu AI v přípravku Lukofob 39, je pro testované vzorky modřínu, smrku, buku a dubu uveden v tabulce 30.

Tab. 30 Příjem aktivní složky silanolu AI dřevěných vzorků pro stanovení pevnosti

Délka máčení [den]	Příjem AI $R_{AI\text{-Volume}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]			
	Modřín opadavý	Smrk ztepilý	Buk lesní	Dub
1/24	4,96	8,35	-	-
1/6	7,95	15,24	21,77	82,40
1/3	12,53	22,00	-	-
1	15,08	25,59	28,51	16,24
3	21,45	28,05	-	-
7	28,86	30,33	37,91	32,42
14	31,45	32,91	-	-
28	39,85	36,33	41,68	40,36

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 30 hodnot.

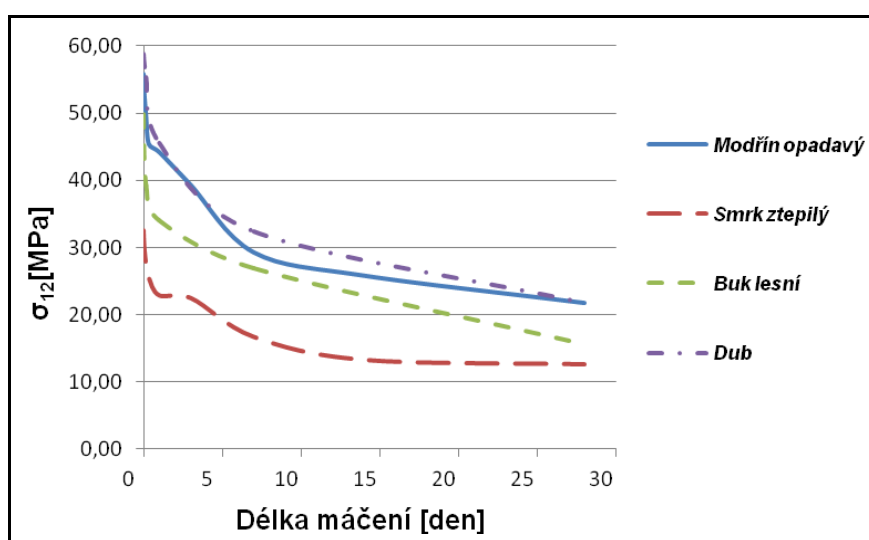
Hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken uměle mineralizovaného dřeva ošetřeného 50 % vodným roztokem přípravku Lukofob 39 při různých délkách máčení, jsou uvedeny v tab. 31. Z hodnot je patrné, že pevnost klesá s rostoucí expozicí vzorku v roztoku a rostoucím příjmem účinné složky. Zároveň bylo zjištěno, že hygroskopicitu dřeva mírně roste s dobou máčení v mineralizačním roztoku. Vlhkost mineralizovaného dřeva v době zkoušky se pohybovala v intervalu od 16 do 30 %, proto byl pevnostní parametr přepočten

na 12 % vlhkost. Pokles tlakové pevnosti podél vláken s 12 % vlhkostí má v závislosti na délce máčení t přibližně exponenciální charakter (obr. 59), který lze vyjádřit rovnicí ve tvaru $\sigma_{12} = e^{(a-b \cdot C)}$ s koeficientem determinace R^2 , která pro modřín opadavý nabývá tvaru $\sigma_{12} = 46,733e^{-0,032t}$ s $R^2 = 0,83$, pro smrk ztepilý $\sigma_{12} = 26,097e^{-0,032t}$ s $R^2 = 0,78$, pro buk lesní $\sigma_{12} = 39,689e^{-0,035t}$ s $R^2 = 0,89$ a pro dub $\sigma_{12} = 50,741e^{-0,032t}$ s $R^2 = 0,87$.

Tab. 31 Pevnost v tlaku dřeva podél vláken σ_w u těles s určitou vlhkostí v době zkoušky a pevnost v tlaku podél vláken σ_{12} po přepočtu na vlhkost 12 % pro dřevo modřínu, smrku, buku a dubu mineralizovaného 50 % roztokem přípravku Lukofob 39

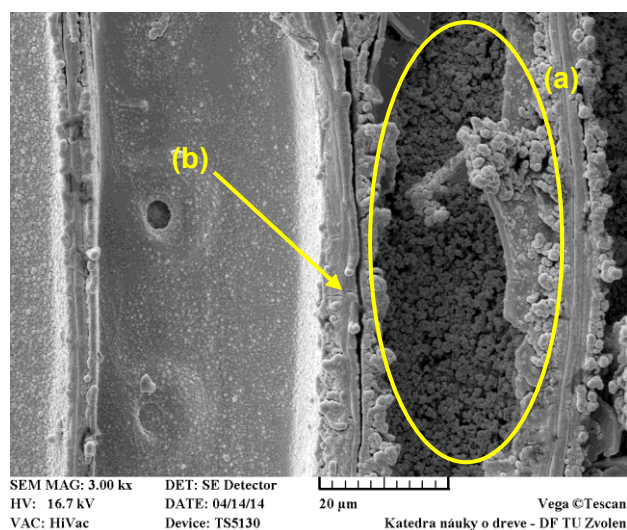
Délka máčení [den]	Pevnost v tlaku podél vláken σ_w, σ_{12} [MPa]							
	Modřín opadavý		Smrk ztepilý		Buk lesní		Dub	
	σ_w	σ_{12}	σ_w	σ_{12}	σ_w	σ_{12}	σ_w	σ_{12}
Neošetřený	53,0 (13,5)	56,0 (14,0)	30,0 (10,5)	32,5 (11,5)	45,5 (9,0)	50,0 (10,0)	55,0 (5,5)	59,0 (6,0)
1/24	47,0 (10,5)	53,0 (12,0)	25,5 (12,0)	30,0 (14,5)	-	-	-	-
1/6	41,5 (10,5)	49,5 (12,5)	21,5 (8,5)	27,5 (11,0)	31,5 (8,0)	39,5 (10,0)	46,0 (8,0)	55,5 (9,5)
1/3	36,5 (13,5)	45,5 (17,0)	19,0 (10,5)	25,5 (14,5)	-	-	-	-
1	35,5 (13,0)	44,0 (16,0)	16,5 (8,5)	23,0 (12,0)	26,0 (8,0)	34,0 (10,5)	37,0 (10,5)	45,5 (13,0)
3	30,5 (12,0)	39,5 (16,0)	16,0 (10,0)	22,5 (14,0)	-	-	-	-
7	26,5 (10,5)	29,5 (11,5)	12,0 (6,0)	17,0 (8,0)	21,0 (8,0)	27,0 (10,5)	26,0 (7,0)	32,5 (9,0)
14	18,0 (8,0)	26,0 (11,5)	9,0 (3,0)	13,5 (4,0)	-	-	-	-
28	13,0 (7,5)	22,0 (12,5)	7,5 (6,0)	12,5 (10,5)	9,0 (7,0)	15,5 (11,5)	14,0 (8,5)	22,0 (13,0)

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 30 hodnot pevnosti dle ČSN 490110 [12]. Čísla v závorkách uvádějí směrodatnou odchylku



Obr. 59 Pevnost v tlaku σ_{12} dřeva podél vláken s 12 % vlhkostí u dřevin ošetřených přípravkem Lukofob 39 v závislosti na délce máčení

K největšímu poklesu pevnosti dřeva dochází při době máčení 28 dnů (nejdelší použitá aplikační doba roztoku), kde pevnost klesá o 61 až 69 %. Tento efekt je pravděpodobně způsoben penetrací roztoku silanolu mezi vrstvy buněčné stěny (obr. 60), kde oslabuje vazby mezi celulózovými a hemicelulózovými řetězci [19, 25]. Pronikání roztoku silanolu mezi vrstvy buněčné stěny bylo již prokázáno SEM (viz kapitola 8.1) a experimentem (viz kapitola 8.3). Obdobný typ penetrace se objevuje i u dřeva přirozeně mineralizovaného.



Obr. 60 SEM snímek smrkového dřeva máčeného v přípravku Lukofob 39 po dobu 28 dnů - vznik granulovitých minerálních usazenin (a), tyto silanolátové struktury pronikají i mezi vrstvy buněčné stěny, což je dobře patrné na jejím řezu (b)

12.2 STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

12.2.1 POSTUP ZKOUŠKY

Příprava zkušebních vzorků je obdobná jako u zkoušky pevnosti v tlaku (viz kapitola 12.1). Zkušební vzorky, v tomto případě o rozměrech 300 × 20 × 20 mm (L×R×T) dle ČSN 490117 [13], byly připraveny z dřeva smrku ztepilého (*Picea abies* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.), buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Quercus* SPP.) (viz kapitola 6.1). Vzorky byly nejprve umístěny do klimatické komory s teplotou 20±2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 70±5 %, dokud nedosáhly ustálené hmotnosti $m_{before-treat}$. Vážení vzorků bylo provedeno s přesností na 0,01 g. Následně byly změřeny rozměry zkušebních vzorků s přesností na 0,01 mm. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet objemu V jednotlivých zkušebních těles.

K ošetření těles byl použit opět Lukofob 39 (viz kapitola 6.2), s 50 % koncentrací vodného roztoku. Tělesa byla ošetřena máčením za atmosférického tlaku $\cong 100$ kPa, teploty 20±1°C, a doby máčení 1/24, 1/6, 1/3, 1, 3, 7, 14, a 28 dnů (pro jehličnaté dřeviny), resp. 1/6, 1, 7, a 28 dnů (pro listnaté dřeviny). Poté byly z povrchu vzorků odstraněny zbytky roztoku filtračním papírem. Příjem aktivní složky roztoku $R_{AI-Volume}$ [kg·m⁻³] byl stejně jako u předchozího mechanického parametru spočítán dle vzorce (19) pro jednotlivá tělesa, která byla po ošetření ihned zvážena ve vlhkém stavu $m_{after-treat}$ s přesností na 0,01 g.

Ošetřená i referenční neošetřená tělesa byla uložena v klimatické komoře při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 70 ± 5 % do dosažení ustálené hmotnosti.

Testování rázové houževnatosti bylo prováděno metodou dle ČSN 490117 [13]. Tato technická norma je primárně určena pro zkoušení listnatých dřevin. Jak již bylo uvedeno, podstatou zkoušky je stanovení odolnosti dřeva proti dynamickému (rázovému) namáhání s využitím Charpyho kladiva (obr. 61). Toto zařízení pracuje na principu změny polohové potenciální energie v kinetickou. Při zkoušce je zjišťována energie potřebná k porušení tělesa ve vztahu k jeho příčným rozměrům. Norma doporučuje provádět zkoušku na sadě 50 zkušebních tělesech. S ohledem na technické možnosti experimentu byl tento počet redukován pouze na 20 těles.



Obr. 61 Stanovení rázové houževnatosti malých bezvadých vzorků v Charpyho kladivu

Tělesa byla do přístroje umístěna tak, aby byla zatěžována kolmo k axiálnímu směru, přičemž příčně rozměry těles a , b byly stanoveny v jeho středu s přesností na 0,01 mm. Těleso bylo umístěno do přístroje tak, aby bylo porušeno jediným úderem kladiva na tangenciální povrch (v radiálním ohybu). Počáteční polohová energie byla nejprve nastavena zafixováním kladiva pod úhlem počátečního vychýlení. Kladivo po uvolnění jediným úderem poruší zkoušené těleso. Obecně je možné vykonanou práci vypočítat na základě hodnot z úchylkoměru přístroje, kdy pomocí vlečného ukazatele lze odečíst velikost úhlu překyvu po přeražení vzorku. V tomto případě je však na displeji přístroje již přímo uvedena práce Q nutná k přeražení vzorku s přesností 0,01 J. Rázová houževnatost A_w [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] při konkrétní vlhkosti materiálu v době zkoušky je následně vypočtena ze vztahu (22) s přesností na $0,1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$:

$$A_w = \frac{Q}{a \times b} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (22)$$

Po zkoušce bylo provedeno stanovení vlhkosti w [%] dřeva vážením pro celá tělesa dle ČSN EN 13183-1 [9]. Zjištěnou hodnotu rázové houževnatosti lze na základě opravného koeficientu α ($\alpha = 0,02$ pro všechny dřeviny) přepočítat pomocí rovnice (23) na rázovou houževnatost při 12 % vlhkosti A_{12} [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] s přesností na $0,1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$:

$$A_{12} = A_w \times (1 + \alpha \times (w - 12)) \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (23)$$

12.2.2 DÍLČÍ VÝSLEDKY

Objemový příjem aktivní silanolové složky AI v přípravku Lukofob 39 je pro vzorky modřínu, smrku, buku a dubu uveden v tabulce 32.

Tab. 32 Příjem aktivní silanolové složky AI vzorků dřeva pro zkoušku rázové houževnatosti

Délka máčení [den]	Příjem AI $R_{\text{AI-Volume}}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]			
	Modřín opadavý	Smrk ztepilý	Buk lesní	Dub
1/24	2,48	3,51	-	-
1/6	4,41	7,13	22,04	6,15
1/3	6,16	8,63	-	-
1	8,28	11,65	25,74	9,20
3	13,93	16,57	-	-
7	15,15	11,78	26,78	15,28
14	20,33	20,64	-	-
28	24,27	18,48	34,53	26,31

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 20 hodnot.

Nižší příjem u vzorků smrkového dřeva po 7 a 28 dnech je způsoben vyšší objemovou hmotností vzorků a také vyšším podílem vzorků z jádrového dřeva ve zkušební sadě. Výsledky stanovení rázové houževnatosti uměle mineralizovaného dřeva ošetřeného 50 % vodným roztokem přípravku Lukofob 39 pro různé délky máčení (od 1/24 do 28 dnů) jsou uvedeny v tab. 33 a v grafu na obr. 62.

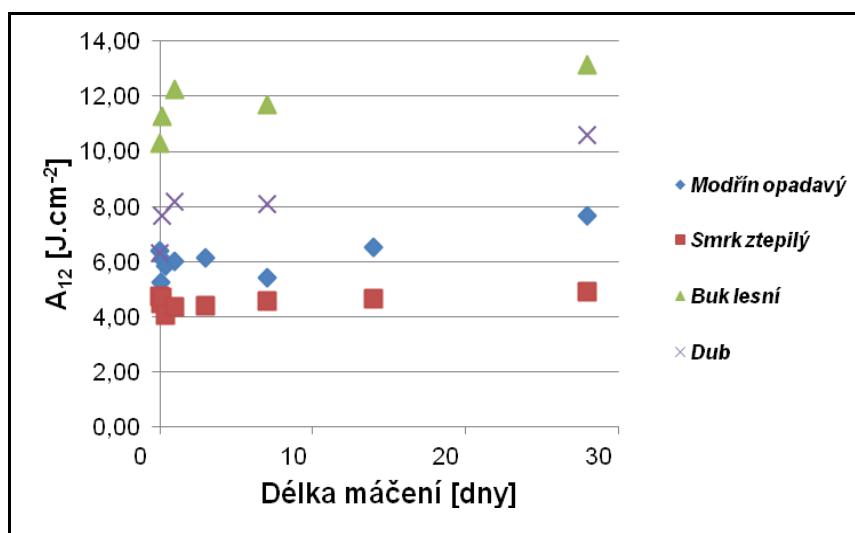
U listnatých dřevin je nárůst rázové houževnatosti poměrně výrazný a dosahuje maximálních hodnot pro nejdélší dobu máčení (28 dnů). Maximální rázová houževnatost při 12 % vlhkosti A_{12} se v porovnání s neošetřenými referenčními vzorky zvýšila přibližně o 27 % u buku lesního a 68 % u dubu. Rázová houževnatost jehličnatých dřevin dosahuje vyrovnaných hodnot pro všechny doby máčení, nevýrazný růstový trend je však také rozpoznatelný. Nárůst rázové houževnatosti činí v tomto případě pro 28 denní máčení 4 % u smrku ztepilého, a až 20 % u modřínu opadavého.

Výsledné hodnoty rázové houževnatosti jsou ovlivněny zejména pronikáním organosilanového roztoku do lumenů a poté i mezi vrstvy buněčné stěny dřeva, což je typické i pro dřevo přirozeně mineralizované [57, 60]. S největší pravděpodobností je zvýšená rázová houževnatost, a tím i křehkost materiálu, způsobena právě tímto ukládáním minerálních částic.

Tab. 33 Rázová houževnatost A_w těles s určitou vlhkostí v době zkoušky a rázová houževnatost A_{12} po přepočtu na 12 % vlhkost vzorků u dřeva modřínu, smrku, buku a dubu mineralizovaného přípravkem Lukofob 39

Délka máčení [den]	Rázová houževnatost A_w, A_{12} [$J \cdot cm^{-2}$]							
	Modřín opadavý		Smrk ztepilý		Buk lesní		Dub	
	A_w	A_{12}	A_w	A_{12}	A_w	A_{12}	A_w	A_{12}
Neošetřený	5,9 (1,7)	6,4 (1,9)	4,3 (1,8)	4,7 (1,9)	9,6 (2,7)	10,3 (2,9)	6,0 (1,4)	6,3 (1,5)
1/24	5,0 (1,5)	5,2 (1,8)	4,2 (1,8)	4,5 (1,9)	-	-	-	-
1/6	5,6 (1,6)	6,1 (2,3)	4,1 (1,4)	4,7 (1,6)	9,8 (2,1)	11,3 (2,4)	6,9 (1,2)	7,7 (1,3)
1/3	5,4 (1,4)	5,8 (2,3)	3,7 (1,2)	4,0 (1,3)	-	-	-	-
1	5,3 (1,7)	6,0 (2,6)	3,7 (1,5)	4,4 (1,8)	10,4 (2,0)	12,3 (2,3)	7,1 (2,0)	8,2 (2,3)
3	5,3 (1,3)	6,1 (2,3)	3,8 (1,3)	4,4 (1,5)	-	-	-	-
7	4,9 (1,6)	5,4 (2,0)	3,9 (1,3)	4,6 (1,5)	9,6 (2,2)	11,7 (2,7)	6,9 (1,7)	8,1 (2,0)
14	5,1 (1,5)	6,5 (2,7)	3,5 (1,1)	4,7 (1,5)	-	-	-	-
28	5,8 (1,9)	7,7 (3,8)	3,8 (1,0)	4,9 (1,3)	9,8 (1,8)	13,1 (2,4)	7,9 (2,5)	10,6 (3,4)

Pozn.: Aritmetický průměr je vypočten z 20 hodnot rázové houževnatosti dle ČSN 490117 [13]. Čísla v závorkách uvádějí směrodatnou odchylku.



Obr. 62 Závislost rázové houževnatosti dřeva A_{12} ošetřeného přípravkem Lukofob 39 na délce máčení (při 12 % vlhkosti testovaných těles)

13. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE

V rámci zpracování předložené doktorské práce byl proveden komplex experimentálních a analytických prací zaměřených na problematiku mineralizace dřeva. První část se týkala popisu mineralizace a diagnostiky mineralizovaného dřeva, včetně posouzení vhodnosti aplikace dostupných analytických a diagnostických metod. Druhá část byla zaměřena na testování vlivu konkrétního hydrofobizačního prostředku na vlastnosti rostlého dřeva vybraných dřevin. Sledován byl vliv mineralizace na vlhkostní vlastnosti dřeva, na jeho mechanické parametry a na odolnost proti biologickým škůdcům.

13.1 POPIS MINERALIZACE DŘEVA

K popisu mineralizace dřeva byly využity dvě analytické metody a jeden experimentální test. Strukturní změny v mineralizovaném dřevě byly hodnoceny pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), dále byly posuzovány charakteristiky nespalitelného a minerálního podílu ve dřevě pomocí metod termické analýzy (TG/DSC). Vazba minerální složky na buněčnou stěnu dřeva byla studována na základě trvalé změny objemu mineralizovaných dřevěných vzorků po 7 denní a 28 denní expozici v hydrofobizačním prostředku.

Bylo potvrzeno, že metodou SEM lze získat klíčové kvalitativní informace o minerálních depozitech ve struktuře dřeva, a to zejména o charakteru minerálních částic (povlaky, krystaly, shluky krystalů) a o jejich lokalizaci v organické matici dřeva. SEM také umožňuje detekovat penetraci roztoku mezi vrstvy buněčných stěn dřeva. Průběh penetrace v radiálním a axiálním směru lze odvodit na základě rozložení minerálních částic. Signifikačním znakem jsou zde zejména zborcené tenkostěnné bublinky roztoku a vzduchové embolie v povlacích, dobře ilustrující penetrační proces a dokumentující hloubku penetrace. Pozorované minerální depozity ve struktuře testovaného dřeva korespondují s depozity nalezenými v přirozeně mineralizovaném dřevě [53].

Pro rozšíření popisu mineralizace dřeva o kvantitativní informace týkající se množství a chemického složení uložených minerálních látek, by bylo vhodné použít další analytické metody, jako např. energeticky disperzní rentgenovou spektroskopii (EDX) nebo mikroskopii zpětně odražených elektronů (BSE), které velmi citlivě reagují na změny atomového čísla, a umožňují proto s větší citlivostí zachytit změny, ke kterým dochází vlivem mineralizace v buněčné stěně. Tyto metody v práci nebyly využity.

Komplementární metodou pro hodnocení stupně mineralizace dřeva byla zvolena termická analýza. Konstrukce termických (TG) křivek umožnila stanovit podíl nespalitelného a spalitelného podílu, na jejichž základě bylo možné odvodit i podíl a koncentraci minerální složky v testovaném dřevě. Zde je nutno uvést, že toto odvození je složitější u přirozeně mineralizovaného dřeva, kde v některých případech nelze spolehlivě charakterizovat původní organickou matici ani oddělenou minerální složku bez použití dalších analytických metod.

Aplikací termické analýzy na vzorcích uměle mineralizovaného dřeva byly ověřeny vztahy pro hodnocení stupně mineralizace, odvozené v kap. 8.2.1. Byla prokázána klesající tendence podílu minerální složky v popelu i koncentrace nespalitelné minerální složky ve dřevě v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku. Dále bylo potvrzeno, že s rostoucí expozicí vzorku v minerálním roztoku roste koncentrace těchto parametrů v povrchových vrstvách dřeva. Zároveň bylo zjištěno, že pro stanovení celkové koncentrace minerální

složky ve dřevě musí být prvotně odvozené vztahy kvůli rozkladu minerální látky během termického ohřevu modifikovány do finální podoby (viz kap. 8.2.2). Takovou modifikaci je možné provést, máme-li k dispozici separát minerální fáze nebo alespoň odparek z roztoku, jak tomu bylo v tomto případě.

Vzhledem k anizotropní povaze dřeva a výskytu různých vad a anomálií v jeho struktuře, nelze prezentované experimentální výsledky vztahovat k celému objemu hodnoceného dřevěného prvku nebo konstrukce. Hodnoty odpovídají charakteru materiálu v měřeném místě a pro získání reprezentativních informací o stupni mineralizace daného prvku nebo konstrukce je nutné provádět sérii měření na vhodně zvolených místech.

Výzkum vazby minerální složky na buněčnou stěnu dřeva měřením trvalých objemových změn mineralizovaných vzorků ukázal, že u testovaného hydrofobizačního prostředku se zvětšení objemu projevilo již při 7 denní expozici vzorků. Při expozici 28 dnů již došlo pouze k dalšímu mírnému nárůstu objemu vzorků. Objemové změny se lišily v závislosti na druhu dřeviny, lze však konstatovat, že vazba na buněčnou stěnu vzniká prokazatelně u všech testovaných dřevin.

13.2 DIAGNOSTIKA MINERALIZOVANÉHO DŘEVA IN SITU

Pro potenciální použití k hodnocení mineralizace dřevěných konstrukcí in situ, byly vybrány a testovány dvě metody, běžně využívané k diagnostice dřevěných konstrukcí - ultrazvuková průchodová metoda a metoda vrtného odporu.

Použitelnost ultrazvukové metody byla ověřována na konstrukčních profilech s potenciálním výskytem mineralizace. Z výsledků provedených měření je zřejmé, že tato zkouška, pracující na principu přenosu akustického vlnění dřevěným prvkem, sice odhalí defekty a nehomogenity v konstrukčním prvku, nedokáže však stanovit rozsah a lokalizaci poškození. To platí i pro určení partií dřeva ovlivněných mineralizací. Konstrukční profily většinou vykazují určitý stupeň povrchové degradace, která znemožňuje získat stabilní signál.

Metoda vrtného odporu umožňuje vyšetřit charakter materiálu v konkrétním místě napříč celým profilem. Tato metoda byla použita jak v případě profilů s potenciálním výskytem mineralizace, tak u profilů uměle mineralizovaných. V případě umělé mineralizace bylo možné na základě počátečního poklesu vrtného odporu identifikovat oblast při povrchu prvku, ovlivněnou mineralizací. Počáteční pokles vrtného odporu se zřetelně projevil jak u přípravku Lukofob 39, tak u roztoku modré skalice. U prostředku na bázi vodního skla byl pokles vrtného odporu pouze nevýrazný, vzhledem k charakteru depozitu, který látka vytváří v lumenech buněk.

Interpretace výsledků měření vrtného odporu je však problematická u původních konstrukčních profilů, kde není možné spolehlivě odlišit degradované povrchové partie dřeva od těch mineralizovaných. Tento typ měření by v praxi musel být kombinován s laboratorními analytickými metodami na vzorcích odebraných z konstrukce, např. výše popsanou SEM nebo termickou analýzou.

13.3 VLHKOSTNÍ CHOVÁNÍ MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

Mineralizace dřeva byla posuzována také z hlediska možné redukce vlhkosti dřeva a s ní spojených vlhkostních objemových změn. Předpokladem bylo, že při mineralizaci dochází k zaplnění lumenů buněk dřeva a částečné vazbě minerálních depozitů na buněčné stěny, čímž se příjem vody omezí jako v případě přirozené mineralizace. U přirozené mineralizace jsou nejčastěji ukládanými minerálními látkami částice SiO_2 , nebo jiné anorganické látky (např. CaCO_3). Z tohoto důvodu lze pro mineralizaci dřeva v praxi považovat za perspektivní existující komerční produkty na bázi křemičitanů, běžně používané k hydrofobizaci silikátových materiálů.

Byl proveden výběr vhodného komerčně dostupného hydrofobizačního prostředku s využitím americké normy ASTM D4446-08, pomocí níž je hodnocen hydrofobizační efekt prostředku na základě vlhkostních změn rozměru vzorků dřeva ve swellometru. Byly posuzovány produkty v praxi používané pro ošetření silikátů, aplikované dle postupů uváděných výrobcem. Z testovaných prostředků dosahoval nejlepšího výsledku produkt na bázi organosilanu Lukofob 39 a to i při nízkých koncentracích. Tento prostředek byl podroben dalšímu testování.

U tohoto prostředku byla (opět dle normy ASTM D4446-08) sledována redukce vlhkostních objemových změn mineralizovaného dřeva, ošetřeného vodnými roztoky s koncentracemi v rozsahu od 1 do 100 %. Účinnost produktu Lukofob 39 proti bobtnání dřeva byla prokázána již od jeho 5 % koncentrace a celkově má rostoucí tendenci. Použití neředěného produktu (koncentrace 100 %) zajistilo účinnost proti bobtnání vyšší než 65 %, a to u obou dřevin použitých v experimentu. Lze však předpokládat, že z ekonomických důvodů nebude v praxi ošetření prostředky se 100% koncentrací široce využíváno.

Kromě měření prováděných ve swellometru byl na vzorcích dřeva ošetřeného přípravkem Lukofob 39 hodnocen úhel smáčení vodou na povrchu hydrofobizovaného dřeva a přípravek byl aplikován také:

- na starém dřevě bez umělého vysušení;
- na vzorcích lepeného lamelového dřeva;
- na vzorcích smrku a břízy s předchozím umělým vysušením.

Výsledky provedených experimentů poskytují informace o vlhkostním chování dřevěných prvků ošetřených organosilanovým přípravkem. Jeho hydrofobizační efekt byl potvrzen zjištěnou hodnotou smáčecího úhlu $> 90^\circ$, která byla stanovena analýzou obrazu vodní kapky na povrchu vzorku. Nárůst vlhkosti způsobený pouze vlivem vzdušné vlhkosti, je u vzorků hydrofobizovaných i nehydrofobizovaných přibližně shodný. Rozdílné je však chování dřeva při výskytu kondenzátu nebo při kontaktu vody v kapalném skupenství se vzorky při simulaci 3. třídy použití, kdy vlhkost vzorků neošetřených (nehydrofobizovaných) dosahuje výrazně vyšších hodnot. Na výslednou hodnotu vlhkosti dřeva má také vliv koncentrace mineralizačního roztoku a druh ošetřené dřeviny. Testujeme-li dřevo, infikované spórami hub nebo plísní (např. původní konstrukční profily), pak při vhodných klimatických podmínkách dochází k rozvoji těchto biologických činitelů zpravidla na dřevě neošetřeném. Testování lepeného lamelového dřeva ukázalo, že u neošetřených (referenčních) vzorků dochází při kontaktu s vodou v kapalném skupenství k prosycení pouze přilehlé lamely, zatímco u ošetřených vzorků není prosycení patrné.

13.4 ODOLNOST MINERALIZOVANÉHO DŘEVA PROTI BIOLOGICKÝM ČINITELŮM

Studována byla rovněž odolnost dřeva, ošetřeného organosilanovým přípravkem, proti hnilobě a plísním, tedy proti biologickým činitelům, které úzce souvisí s vlhkostí dřeva a pro stavební účely je nutné je identifikovat. Vliv přípravku Lukofob 39 byl sledován při jeho aplikaci ve formě vodného roztoku v koncentracích od 6,5 do 100 %.

Účinnost proti hnilobě se částečně projevila již při 6,5 % koncentraci, a dále narůstala až do 100 % koncentrace roztoku. Lukofob 39 ve většině případů potlačil růst „hnědé hniloby“ způsobené houbou *Serpula lacrymans*, a také houbou *Coniophora puteana*. Vliv přípravku na redukci bílé hniloby (ligninovorných hub), konkrétně vícevrstvé chorošovitě houby *Trametes versicolor*, nebyl již tak výrazný.

Účinnost přípravku proti plísním druhu *Aspergillus niger* a *Penicillium* sp. byla patrná zejména na počátku testovacího období, s časem však stupeň plísňové aktivity MA narůstal. Nicméně, nejvyšší účinnosti proti plísním bylo dosaženo při koncentraci roztoku 100 %.

Lze tedy konstatovat, že i když aplikace testovaného přípravku není přímo cílena na zvýšení odolnosti dřeva proti biologickým škůdcům, při použití roztoků s vyššími koncentracemi lze i s tímto vlivem počítat. Tento efekt je pravděpodobně způsoben výrazně zásaditým charakterem látky s pH 13,5 při 100 % a pH 12 při 6,5 % koncentraci. Vzhledem k již zmíněné ekonomické náročnosti ošetření, však v praxi velmi pravděpodobně nebude tento pozitivní efekt považován za zásadní při ochraně dřevěných konstrukčních prvků. Při nedostatečné přirozené trvanlivosti použitých dřevin v daných prostředích bude proto vhodné doplnit mineralizační ošetření nebo modifikaci o adekvátní ošetření proti biologickým činitelům, například ve formě fungicidů.

13.5 MECHANICKÉ PARAMETRY MINERALIZOVANÉHO DŘEVA

Pro posouzení možného vlivu mineralizace dřeva na jeho mechanické vlastnosti byly sledovány dva parametry, a to pevnost v tlaku dřeva podél vláken (která dobře koreluje s dalšími mechanickými parametry) a rázová houževnatost (která má zásadní význam při popisu charakteru mechanického poškození). Testy byly zaměřeny především na posouzení vlivu délky expozice dřeva v roztoku na uvedené mechanické parametry.

Hodnocením pevnosti v tlaku podél vláken ošetřených vzorků dřeva byl zjištěn výrazný pokles pevnosti, a to zejména u vzorků dlouhodobě máčených v roztoku. Pokles pevnosti dosahoval až 80 % pro dobu máčení 28 dnů. Tento efekt je pravděpodobně způsoben kombinací řady faktorů. Za dominantní faktory lze považovat depozici minerálních částic a dobu máčení. V tomto případě byly vzorky téměř nasyceny organosilanem po 28 dnech. Na stěnách buněk ve struktuře dřeva vznikají zrnité až hladké křehké filmy křemičitanu značné tloušťky, přičemž při dlouhodobé expozici může křemičitan pronikat i mezi vrstvy sekundární buněčné stěny. Vlivem tohoto ukládání se pravděpodobně oslabuje vazba mezi celulóзовými a hemicelulóзовými řetězci a to způsobuje snížení pevnosti. Dalším důležitým faktorem je vlhkost materiálu, způsobená rostoucí hygroskopicitou, která se mírně zvyšuje s dobou máčení. Zvýšená hygroskopicita nebyla zjištěna u krátkodobě mineralizovaného dřeva. Vliv vlhkosti na výsledky testů byl proto eliminován přepočtem na 12 % vlhkost materiálu. Vliv hustoty dřeva, vzhledem k vysoké variabilitě hodnot v rámci zkušebních sad, hodnocen nebyl.

Zjištěná výrazná závislost mezi délkou máčení dřeva a jeho výslednou pevností v tlaku podél vláken jednoznačně ukazuje, že hydrofobní ošetření konstrukčních dřevěných prvků v praxi bude účelné především při krátkodobém máčení v hydrofobizačním roztoku, a to v řádu minut eventuálně hodin, aby zůstaly zachovány pevnostní parametry materiálu.

Při testování rázové houževnatosti s využitím Charpyho kladiva bylo naopak zjištěno, že hodnoty tohoto parametru mají tendenci se zvyšovat s délkou máčení, u všech použitých dřevin. Z naměřených hodnot lze vysledovat, že k největšímu nárůstu rázové houževnatosti došlo po 28 dnech máčení. Po této době se hodnoty parametru zvýšily o přibližně 4 % u smrku ztepilého, o 20-27 % u modřínu opadavého a buku lesního, a o 68 % u dubu. Hlavními faktory, ovlivňujícími rázovou houževnatost ošetřeného dřeva, a tím i jeho křehkost, jsou pravděpodobně opět ukládání minerálních částic ve struktuře dřeva a doba máčení v roztoku. Z dalších pravděpodobných faktorů lze uvést vliv zvýšené hygroscopicity materiálu, který byl obdobně jako v případě pevnosti dřeva upraven přepočtem na 12 % vlhkost materiálu. Vliv hustoty dřeva, vzhledem k vysoké variabilitě hodnot v rámci zkušebních sad, hodnocen nebyl.

Vzhledem k značnému rozptylu naměřených hodnot, nelze spolehlivě definovat korelační vztahy mezi rázovou houževnatostí a délkou máčení dřeva v roztoku, eventuálně mezi rázovou houževnatostí a příjmem aktivní složky mineralizačního roztoku.

Lze tedy konstatovat, že rázová houževnatost dřeva má tendenci se zvyšovat s délkou máčení dřeva v mineralizačním roztoku, na rozdíl od pevnosti dřeva v tlaku podél vláken. Platí to pro všechny dřeviny použité v experimentu. Nevýhodou je, že současně s nárůstem rázové houževnatosti se zvyšuje i křehkost materiálu. Vzhledem k tomu, že pro použité dřeviny s výjimkou dubu je rázová houževnatost po 28 dnech máčení maximálně o cca 30 % vyšší, pro aplikaci ve stavebnictví nevznikají významná omezení. V případě ošetřeného dubového dřeva je však nutno navrhnout a ověřit vhodnou metodu montáže, zejména s ohledem na použité spojovací prvky a opracovávání mineralizovaných profilů.

14. ZÁVĚR A VÝZNAM PRO PRAXI

Pochopení procesů spojených s přirozenou mineralizací dřeva a jejich simulace v laboratorních podmínkách, je zásadním předpokladem pro uplatnění a rozšíření této metody modifikace vlastností materiálu ve stavební praxi. V tomto směru přináší předložená práce řadu nových a prakticky využitelných poznatků a doporučení, které mohou být základem pro tvorbu technologických postupů mineralizace dřevěných konstrukčních prvků v praxi.

Byl navržen komplex vhodných analytických metod a experimentálně ověřeny možnosti jejich aplikace pro identifikaci a charakterizaci mineralizačních komponent ve dřevě různých druhů dřevin, včetně využití standardních metod používaných při diagnostice dřevěných konstrukcí.

Jako efektivní analytický nástroj pro popis přirozené i umělé mineralizace byla doporučena elektronová mikroskopie SEM, pomocí níž lze kvalitně zhodnotit charakter depozice minerálních částic ve struktuře dřeva a také hloubku penetrace mineralizačního roztoku do materiálu. Pro kvantifikaci minerální složky v ošetřeném dřevě byla navržena a ověřena aplikace metod termické analýzy, včetně odvození základních vztahů pro kvantitativní popis mineralizace.

Pro potvrzení vazby mineralizačního roztoku na buněčnou stěnu dřeva byl navržen a realizován experiment založený na hodnocení objemových změn mineralizovaných vzorků.

Provedená série laboratorních testů na reálných konstrukčních profilech potvrdila, že hodnocení mineralizace dřevěných konstrukčních prvků nelze spolehlivě provádět pouze pomocí běžných in situ diagnostických metod.

Na základě provedeného výzkumu byly vybrány a otestovány vhodné mineralizační látky, jejichž aplikace na dřevo vede k významné redukci příjmu kapalné vody do pórového systému materiálu, a tím také k redukci vlhkostních objemových změn. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím přípravku obsahujícího methylsilanolát draselný jako účinnou složku. Tato látka, primárně určená pro hydrofobizaci silikátových stavebních hmot, vykazuje vysoký potenciál využití pro dřevěné materiály. Výsledky experimentů také prokázaly, že rostoucí koncentrace mineralizačního roztoku významně omezuje příjem vody do ošetřeného dřeva. Vzhledem k ekonomické náročnosti ošetření však koncentrace mineralizačního roztoku zřejmě nebude v praxi jediným rozhodujícím parametrem z hlediska účinnosti provedeného zásahu. Pro konkrétní stavební konstrukce a použité dřeviny bude nutno určovat vhodná řešení (množství přípravku, koncentraci roztoku, způsob aplikace, atd.) na základě příslušných testů.

Práce přinesla nové poznatky o chování uměle mineralizovaného dřeva při jeho expozici v různých podmínkách uložení, tzv. třídách použití. Získaná experimentální data ukázala, že u krátkodobě mineralizovaného dřeva je omezen příjem kapalné vody při zachování téměř konstantní hygroscopicity materiálu.

Kromě vlastností, spojených s příjmem vody, byl prokázán také pozitivní vliv mineralizace na odolnost dřeva proti dřevokazným houbám a plísním.

Za významné zjištění v kontextu praktických aplikací lze považovat negativní vliv mineralizace na pevnost dřeva. Dlouhodobá expozice dřeva v mineralizačním roztoku vede ke snížení pevnosti dřeva v tlaku a k mírnému zvýšení jeho hygroskopicity. Délka ošetření dřevěných konstrukčních prvků proto musí být v praxi jedním z kontrolovaných faktorů.

Práce také přinesla řadu nových otázek, které bude nutno řešit v dalších etapách výzkumu. Důležitým tématem je např. dlouhodobá stabilita minerálních složek v ošetřeném dřevě, ověření poznatků disertační práce na dalších druzích dřeva používaných ve stavební praxi nebo vliv mineralizace na vlastnosti materiálů na bázi dřeva, jako jsou překližované nebo vrstvené desky, aglomerované dřevo, lepené lamelové dřevo, apod. V práci také nebyla řešena např. otázka vlivu mineralizace na spojovací prvky, lepené spoje, nebo povrchové úpravy dřeva, jako jsou nátěry, povlaky, sanační přípravky, atd.

V současných učebních plánech FAST VŠB-TU Ostrava je problematika mineralizace dřeva zahrnuta zatím pouze částečně, a to ve formě praktických experimentů ve cvičení z předmětů 223-0152/01: Technologie sanací a 223-0072/01: Sanace staveb, v bakalářském studijním oboru 3647R019: Stavební hmoty a diagnostika staveb a v magisterském oboru 3607T021: Stavební hmoty a diagnostika staveb.

Mezi tématy odborných přednášek tato problematika dosud chybí. Vzhledem k potenciálu mineralizace jako metody modifikace vlastností dřevěných materiálů, bude v budoucnu žádoucí věnovat této oblasti ve výuce podstatně větší pozornost.

Autorka práce se aktivně podílela na zavedení experimentů s mineralizací dřeva do osnov praktických cvičení na FAST VŠB-TUO a v současné době vede první diplomové práce na toto zajímavé téma.

POUŽITÉ ZDROJE

NORMATIVNÍ ZDROJE

- [1] ASTM D4446-08 Standard Test Method for Anti-Swelling Effectiveness of Water-Repellent Formulations and Differential Swelling of Untreated Wood When Exposed to Liquid Water Environments (2008).
- [2] ČSN EN 113: Ochranné prostředky na dřevo - Zkušební metody na stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes - Stanovení hranice účinnosti (1998).
- [3] ČSN EN 330: Ochranné prostředky na dřevo. Postup zkoušek pro zjišťování relativní účinnosti ochranného prostředku na dřevo použitého pod nátěrem a mimo styk se zemí ve volné přírodě: Metoda L-spoje (2015).
- [4] ČSN EN 335: Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva - Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva (2013).
- [5] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti (2016).
- [6] ČSN EN 350-2: Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi - Přirozená trvanlivost rostlého dřeva - Část 2: Přirozená trvanlivost a impregnovatelnost vybraných dřevin důležitých v Evropě (1996).
- [7] ČSN EN 408: Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností (2012).
- [8] ČSN EN 460: Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Požadavky na trvanlivost dřeva pro jeho použití v třídách ohrožení (1996).
- [9] ČSN EN 13183-1: Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou (2004).
- [10] ČSN EN 14080: Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky (2013).
- [11] ČSN EN 15457: Nátěrové hmoty - Laboratorní metoda zkoušení účinnosti konzervačních prostředků v nátěru proti působení hub a plísní (2008, nová norma od 1. 1. 2015).
- [12] ČSN 490110 Dřevo. Medza pevnosti v tlaku v směru vláken (1980).
- [13] ČSN 490117 Dřevo. Rázová húževnatost' v ohybe (1982).

ODBORNÉ KNIHY

- [14] BUURMAN, P.: *Mineralization of fossil wood*. Leiden: Scripta geologica, 1972. OCLC: 707902.
- [15] DOLNÍČEK, Z.: *Laboratorní metody Výzkumu*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2005.
- [16] GLÁSER, P., NEJEDLÝ, V., et al.: *Organokřemičitany v české památkové praxi*. Praha: NPÚ, 2008. ISBN: 978-80-87104-15-6.
- [17] HILL, C. A. S.: *Wood modification - chemical, thermal and other processes*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2006. ISBN: 978-0-470-02172-9.
- [18] HORÁČEK, P.: *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: MZLU, 2008. ISBN: 978-80-7375-169-2.
- [19] HORSKÝ, D., REINPRECHT, L.: *Štúdia subfossilného dubového dreva*. Zvolen: VŠLD Zvolen, 1986.
- [20] KILLOPS, S., KILLOPS, V.: *Introduction to organic geochemistry*. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. ISBN: 978-0-632-06504-2.

- [21] KOLEKTIV AUTORŮ: *Vybrané kapitoly k tématu péče o stavební a umělecké památky II. díl*. Praha: Idea servis, 2008. ISBN: 978-80-85970-62-3.
- [22] MAMOŇOVÁ, M.: *Wood Anatomy*. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2013. ISBN: 978-80-228-2499-6.
- [23] POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M.: *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN: 80-07-00960-4.
- [24] RAMACHANDRAN, V. S., PAROLI, M. R., BEAUDOIN, J. J., DELGADO, H. A.: *Handbook of thermal analysis of construction materials*. Norwich: William Andrew, 2002. ISBN: 0-8155-1487-5.
- [25] REINPRECHT, L.: *Ochrana dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004. ISBN: 978-80-228-1863-6.
- [26] SCHMID, P.: *Základy zkušebnictví*. Brno: VUT, 2004. ISBN: 80-214-2584-9.
- [27] SVOBODA, L. et al.: *Stavební hmoty*. Bratislava, JAGA, 2004. ISBN: 80-8076-007-1.
- [28] ŠESTÁK, J.: *Měření termofyzikálních vlastností pevných látek: Teoretická termická analýza*. Praha, Academia, 1982. ISBN: 21-104-82.
- [29] ŠTARHA, P., TRÁVNÍČEK, Z.: *Termická analýza*. Olomouc: UP Olomouc, 2011.
- [30] TREBULA, P., KLEMENT, I.: *Sušenie a hydrotermická úprava dreva*. Technical University in Zvolen, Zvolen, 2002. ISBN: 80-228-1182-3.
- [31] WITZANY, J., et al.: *PDR – Poruchy, degradace a rekonstrukce*. Praha: ČVUT, 2010. ISBN: 978-80-01-04488-9.
- [32] ZEIDLER, A.: *Lexikon dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012.
- [33] ŽÁK, J., REINPRECHT, L.: *Ochrana dřeva ve stavbě*. Praha: ABF, 1998. ISBN: 80-86165-00-0.

ODBORNÉ ČLÁNKY

- [34] AKAHANE, H., FURUNO, T., MIYAJIMA, H., YOSHIKAWA, T., YAMAMOTO, S.: *Rapid wood silicification in hot spring water: an explanation of silicification of wood during the Earth's history*. Sedimentary Geology Vol. 169 (2004), pp. 219 – 228. ISSN: 0037-0738.
- [35] BAYSAL, E., SONMEZ, A., COLAK, H., TOKER, H.: *Amount of leachant and water absorption of wood treated with borates and water repellents*. Bioresource Technology Vol. 97 (2006), pp. 2271 – 2279. ISSN: 0960-8524.
- [36] BREBU, M., VASILE, C.: *Thermal degradation of lignin – a review*. Cellulose chemistry and technology Vol. 44 (2010), pp. 353-363. ISSN: 0576-9787.
- [37] CALDERONI, C., DE MATTEIS, G., GIUBILEO, C., MAZZOLANI, F.M.: *Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements*, Engineering Structures Vol. 32 (2010), pp. 442 - 448. ISSN: 0141-0296.
- [38] DE VETTER, L., VAN DEN BULCKE, J., VAN ACKER, J., 2010: *Impact of organosilicon treatments on the wood-water relationship of solid wood*. Holzforschung Vol. 64 (2010), pp. 463-468. ISSN: 1437-434X.
- [39] DONATH, S., MILITZ, H., MAI, C.: *Creating water-repellent effects on wood by treatment with silanes*. Holzforschung Vol. 60 (2006), pp. 40-46. ISSN: 1437-434X.
- [40] DONATH, S., MILITZ, H., MAI, C.: *Treatment of wood with aminofunctional silanes for protection against wood destroying fungi*. Holzforschung Vol. 60 (2006), pp. 210-216. ISSN: 1437-434X.
- [41] DVINSKIKH, S. V., HENRIKSSON, M., MENDICINO, A. L., FORTINO, S., TORATTI, T.: *NMR imaging study and multi-Fickian numerical simulation of moisture transfer in Norway spruce samples*. Engineering Structures Vol. 33 (2011), pp. 3079 – 3086. ISSN: 0141-0296.

- [42] EITELBERGER, J., HOFSTETTER, K.: *A comprehensive model for transient moisture transport below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation*. International Journal of Thermal Sciences Vol. 50 (2011), pp. 1861 – 1866. ISSN: 1290-0729.
- [43] EITELBERGER, J., HOFSTETTER, K., DVINSKIKH, S. V.: *A multi-scale approach for simulation of transient moisture transport processes in wood below the fiber saturation point*. Composites Science and Technology Vol. 71 (2011), pp. 1727 – 1738. ISSN: 0266-3538.
- [44] ESCH, M., HOFMANN, D., KREBS, G., THIERFELDER, C., WIINSCH, R., MAIER, R., KUZEL, M., SCHOSNIG, M., GROENEVELD, K.O.: *Elemental composition of different types of wood*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B Vol. 109 – 110 (1996), pp. 328 – 331. ISSN: 0168-583X.
- [45] GÖRLACHER, R., HÄTTICH, R.: *Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrenwiderstandsmessung*. Sonderausdruck aus Bauen mit Holz Vol. 6 (1990). ISSN: 0005-6545.
- [46] HSIEH, CH. T., CHANG, B. S., LIN, J. Y.: *Improvement of water and oil repellency on wood substrates by using fluorinated silica nanocoating*. Applied Surface Science Vol. 257 (2011), pp. 7997 – 8002. ISSN: 0169-4332.
- [47] CHANG, H. – T., CHANG S. – T.: *Moisture excluding efficiency and dimensional stability of wood improved by acylation*. Bioresource Technology Vol. 85 (2002), pp. 201 – 204. ISSN: 0960-8524.
- [48] CHITTENDEN, C., SINGH, T.: *Antifungal activity of essential oils against wood degrading fungi and their applications as wood preservatives*. International Wood Products Journal Vol. 2 (2011), pp. 44-48. ISSN: 2042-6453.
- [49] JAE, J., TOMPSETT, G. A, LIN, Y.- CH., CARLSON, T. R., SHEN, J., ZHANG, T., YANG, B., WYMAN, CH. E., W. CONNERA, W. C., HUBER, G. W.: *Depolymerization of lignocellulosic biomass to fuel precursors: maximizing carbon efficiency by combining hydrolysis with pyrolysis*. Energy and Environmental Science (2010), pp. 358-365. ISSN: 1754-5692.
- [50] JOHNSON, S. A., OLLIVIER, P.J., MALLOUK, T.E.: *Ordered mesoporous polymers of tunable pore size from colloidal silica templates*. Science Vol. 283 (1999), pp. 963 – 965. ISSN 1095-9203.
- [51] KIM, K., JEONG, E.K., SUZUKI, M., HUH, M., PAIK, I.S.: *Some coniferous fossil woods from the Cretaceous of Korea*. Geosciences Journal Vol. 6 (2002), pp. 131 – 140. ISSN: 1598-7477.
- [52] KIM, S.G., KIM, K.W., PARK, E.W., CHOI, D.: *Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast*. Phytopathology Vol. 92 (2002), pp. 1095 – 1103. ISSN: 0031-949X.
- [53] KIM, K. W., YOON, CH. J., KIM, P. G., LEE, M. B., LIM, J. H.: *Fine structure and X-ray microanalysis of silicified woods from a Tertiary basin Pohang, Korea by scanning electron microscopy*. Micron Vol. 40 (2009), pp. 519 – 525. ISSN: 0968-4328.
- [54] KLOIBER, M., KOTLÍNOVÁ, M.: *Nedestruktivní defektoskopické přístroje používané při provádění stavebně technických průzkumů historických dřevěných konstrukcí*. Stavební ročenka XV (2005), pp. 39-43. ISSN 0232-0819.
- [55] KLOIBER, M., KOTLÍNOVÁ M.: *Vliv orientace a šířky letokruhů na šíření ultrazvuku ve struktuře dřeva*. Workshop NDT 2005, Non-destructive Testing in Engineering Practice, pp. 53-59. ISBN: 80-7204-420- 6.

- [56] KUCZUMOW, A., CHEVALLIER, P., DILLMANN, P., WAJNBERG, P., RUDAS, M.: *Investigation of petrified wood by synchrotron X-ray fluorescence and diffraction methods*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy Vol. 55 (2000), pp. 1623 – 1633. ISSN: 0584-8547.
- [57] KUCZUMOW, A., PIKUS, S., UN-RO, C., SADOWSKI, P., WAJNBERG, P., JUREK, M.: *Structural investigations of a series of petrified woods of different origin*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy Vol. 56 (2001), pp. 339 – 350. ISSN: 0584-8547.
- [58] KURUMADA, K., NAKABAYASHI, H., MURATAKI, T., TANIGAKI, M.: *Structure and formation process of silica microparticles and monolithic gels prepared by the sol-gel method*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Vol. 139 (1998), pp. 163 – 170. ISSN: 0927-7757.
- [59] MOHAMMED-ZIEGLER, I., TÁNCZOS, I., HÓRVÖLGYI, Z., AGOSTON, B.: *Water-repellent acylated and silylated wood samples and their surface analytical characterization*. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects Vol. 319 (2008), pp. 204 – 212. ISSN: 0927-7757.
- [60] NOWAK, K., FLOREKA, M., KWIATEK, W., LEKKI, J., CHEVALLIER, P., ZIĘBA, E., MESTRES, N., DUTKIEWICZ, E. M., KUCZUMOW, A.: *Composite structure of wood cells in petrified wood*. Materials Science and Engineering: C Vol. 25 (2005), pp. 119 – 130. ISSN: 0928-4931
- [61] SEDIGHI-GILANI, M., GRIFFA, M., MANNES, D., LEHMANN, E., CARMELIET, J., DEROME, D.: *Visualization and quantification of liquid water transport in softwood by means of neutron radiography*. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 55 (2013), pp. 6211 – 6221. ISSN: 0017-9310.
- [62] SNELLING, A.A.: *“Instant” petrified wood*. Creation Vol. 17 (1995), pp. 38 – 40. ISSN: 0819-1530.
- [63] VAN MEEL, P. A., ERICH, S. J. F., HUININK, H. P., KOPINGA, K., DE JONG, J., ADAN, O. C. G.: *Moisture transport in coated wood*. Progress in Organic Coatings Vol. 72 (2011), pp. 686 – 694. ISSN: 0300-9440.
- [64] VIRTÁ, J., KOPONEN, S., ABSETZ, I.: *Modelling moisture distribution in wooden cladding board as a result of short-term single-sided water soaking*. Building and Environment Vol. 41 (2006), pp. 1593 – 1599. ISSN: 0360-1323.
- [65] WEIBEL, R.: *Petrified wood from an unconsolidated sediment, Voervadsbro, Denmark*. Sedimentary Geology Vol. 101 (1996), pp. 31 – 41. ISSN: 0037-0738.
- [66] YOON, CH. J., KIM, K. W.: *Anatomical descriptions of silicified woods from Madagascar and Indonesia by scanning electron microscopy*. Micron Vol. 39 (2008), pp. 825-831. ISSN: 0968-4328.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [67] <http://erac.cz/> [vid. 2013-8-20]
- [68] <http://www.geovedy.cz> [vid. 2013-8-20]
- [69] <http://www.isibrno.cz/lem/tescan.html> [vid. 2015-1-5]
- [70] <http://www.kittfort.cz/> [vid. 2014-7-30]
- [71] <http://www.lucebni.cz/> [vid. 2014-7-30]
- [72] <http://www.mach-chemikalie.cz/> [vid. 2014-3-30]
- [73] <http://www.roubenkyasruby.cz> [vid. 2013-8-20]
- [74] <http://www.tainstruments.com> [vid. 2013-8-20]

DALŠÍ ZDROJE

- [75] Atlas of Thermoanalytical Curves: (TG-, DTG-, DTA-curves Measured Simultaneously). Pennsylvania: Hayden and Son, 1977. ISBN: 978-0471258537.
- [76] DE VETTER, L., VAN ACKER, J.: *Accelerated L-joint performance testing of organosilicon treated wood*. Stockholm: The International Research Group on Wood Protection, 2010. Document No. IRG/WP/10–30551.
- [77] GOSH, S.C., MAI, C., MILITZ, H.: *The efficacy of commercial silicones against blue stain and mould fungi in wood*. Stockholm: The International Research Group on Wood Protection, 2008. Document No. IRG/WP/08–30471.
- [78] ROWELL, R. M., W., BANKS, B.: *Water Repellency and Dimensional Stability of Wood*. Madison: Forest Products Laboratory – General technical report, 1985. FPL-50.
- [79] SIMON, F., MARCHAL, F., POCHON, F., KUTNIK, M., LA BAYON, I.: The potential of silicone-based formulations to enhance wood properties through industrial treatment for outdoor use. Stockholm: The International Research Group on Wood Protection, 2011. Document No. IRG/WP/11–30578 .
- [80] TANG, W.K., EICKNER, H.W.: *Effect of Inorganic Salts on Pyrolysis of Wood, Cellulose, and Lignin Determined by Differential Thermal Analysis*. Madison: Forest Products Laboratory – Research paper, 1968. FPL-82.
- [81] User manual for PUNDIT LAB. Schwerzenbach: PROCEQ SA, 2010.
- [82] WILLIAMS, R.S., FEIST, W.C.: *Water repellents and water repellent preservatives for wood*. Madison: Forest Products Laboratory – General technical report, 1999. FPL-GTR-109.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Důlní výdřevy – Poštovní štola, Zlaté hory
- Obr. 2 Vzorky mineralizovaného dřeva ze Sbírký Geologického pavilonu Prof. F. Pošepného, VŠB - Technická univerzita Ostrava
- Obr. 3 Povětrnostní stárnutí dřeva
- Obr. 4 Smáčecí úhel pro vodu na hydrofobizovaném a nehydrofobizovaném povrchu [67]
- Obr. 5 Hierarchické uspořádání stavby jehličnatých dřevin (University of Canterbury, grafické zpracování M. Harrington) [41]
- Obr. 6 Elektronová mikroskopie mineralizovaného dřeva [53]
- Obr. 7 Kinetika nasákavosti subfosilního (A_{DB}) a současného (S_{DB}) dubového dřeva [19]
- Obr. 8 Závislost tlakové pevnosti rovnoběžně s vlákny na absolutní vlhkosti vzorků dřeva subfosilního (A_{DB}) a současného (S_{DB}) dubu [19]
- Obr. 9 Hrotový odporový vlhkoměr
- Obr. 10 Schémata energetických efektů při termickém rozkladu dřeva a jeho složek [25]
- Obr. 11 TG a DTG křivky rostlého javorového dřeva (plně černě), pevného zbytku po extrakci hemicelulózy (celulózo – ligninová pevná látka, čerchovaně šedě), a pevného zbytku po extrakci hemicelulózy i celulózy (ligninový zbytek, tečkovaně šedě) s rychlostí ohřevu $15\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ od 50 °C do 800 °C . [49]
- Obr. 12 TG a DTG křivka tří základních organických složek dřeva [36]
- Obr. 13 Umístění sond při ultrazvukové diagnostice dřevěných konstrukčních prvků
- Obr. 14 Vlhkost v buňkách dřeva a vlhkostní objemové změny [73]
- Obr. 15 Zkušební vzorky dřeva ve swellometru
- Obr. 16 Řezy a směry v dřevě [23]
- Obr. 17 Rovnovážná vlhkost dřeva [30]
- Obr. 18 Příklad testovaných vzorků původních konstrukčních profilů
- Obr. 19 Depozice alofanů na důlních stěnách a prvcích výdřev – Modrá štola, Zlaté hory
- Obr. 20 Obr. 20 Preparáty modřínu opadavého pro SEM ošetřené 1 – roztokem vodního skla (Na_2SiO_3) po 28 dnech, 2 – roztokem modré skalice ($\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po 28 dnech, 3 – roztokem přípravku Lukofob 39 po 1 dnu, 4 – roztokem přípravku Lukofob 39 po 28 dnech
- Obr. 21 Vzorky ošetřené organosilanem (Lukofob 39) po 24 hodinách
- Obr. 22 Vzorky ošetřené organosilanem (Lukofob 39) po 28 dnech
- Obr. 23 Vzorky ošetřené vodním sklem po 28 dnech
- Obr. 24 Vzorky ošetřené roztokem $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ po 28 dnech
- Obr. 25 Termický analyzátor
- Obr. 26 Přírůstkový vrták
- Obr. 27 Příklad záznamu termické analýzy – modřín opadavý ošetřený přípravkem Lukofob 39 po dobu 14 dnů (6. válcové tělísko od povrchu)
- Obr. 28 Porovnání křivek termické analýzy u povrchových vrstev u smrku ztepilého – referenční vzorek (smrk_ref4), ošetřené vzorky roztokem modré skalice ($\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po dobu 8 hodin ($S_{\text{CU_B_acv1}}$), 28 dnů ($S_{\text{CU_G_amo1}}$)

- Obr. 29 Porovnání křivek termické analýzy povrchových vrstev u buku lesního – referenční vzorek (buk_ref7), ošetřené vzorky roztokem vodní skla (Na_2SiO_3) po dobu 8 hodin (B_NA_B_amo1), 28 dnů (B_NA_G_acv1)
- Obr. 30 Porovnání křivek termické analýzy povrchových vrstev u modřínu opadavého – referenční vzorek (modrin_ref2), ošetřené vzorky roztokem přípravku Lukofob 39 po dobu 4 hodin (M_SI_A_amo1) 8 hodin (M_SI_B_acv1), 1 dne (M_SI_C_acv1), 3 dnů (M_SI_D_amo1), 7 dnů (M_SI_E_acv1) 14 dnů (M_SI_F_amo1), 28 dnů (M_SI_G_amo1)
- Obr. 31 Termická křivka ze vzorků, získaných jednostranným odběrem z válcového vývrtnu u dubu ošetřeného roztokem přípravku Lukofob 39 po dobu 28 dnů
- Obr. 32 Podíl minerální složky v popelu Δ_{\min} (a) a koncentrace nespalitelné minerální složky c_{\min} (b) u vzorku dubu ošetřeného roztokem Lukofob 39 po dobu 28 dnů (odpovídající termické křivky viz obr. 31)
- Obr. 33 Termická analýza odparku přípravku Lukofob 39 s vyznačením hmotnostní ztráty při 900 °C
- Obr. 34 Porovnání výsledků termických analýz alofanů z Poštovní (čerchovaně) a Modré (plně) štoly s rychlostí ohřevu $10\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 1000 °C v redukční atmosféře
- Obr. 35 Porovnání výsledků termických analýz výdřev z Poštovní (čerchovaně) a Modré (plně) štoly s rychlostí ohřevu $10\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 900 °C v redukční atmosféře
- Obr. 36 Přístroj PUNDIT LAB
- Obr. 37 Měření s přístrojem PUNDIT LAB (přiložení sond k povrchu vzorku)
- Obr. 38 IML Resistograph PD – 200
- Obr. 39 Měření s přístrojem Resistograph 4453-P
- Obr. 40 Záznam měření vrtného odporu u vzorku dubu ošetřeného prostředkem Lukofob 39 po dobu 28 dnů
- Obr. 41 Záznam měření vrtného odporu vzorku buku ošetřeného modrou skalicí ($\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) po dobu 28 dnů
- Obr. 42 Záznam měření vrtného odporu vzorku modřínu ošetřeného vodním sklem (Na_2SiO_3) po dobu 28 dnů
- Obr. 43 Záznam vrtného odporu vzorku s výsušnou trhlinou (obr. 18b)
- Obr. 44 Záznam vrtného odporu povrchově degradovaného vzorku (obr. 18a)
- Obr. 45 Schéma odběru vzorků pro testování účinnosti hydrofobizátorů
- Obr. 46 Závislost relativní účinnosti přípravku Lukofob 39 proti bobtnání AS_{relative} u vzorků borovice lesní a smrku ztepilého na koncentraci použitého roztoku
- Obr. 47 Experimentální fáze č. 4 – aplikace roztoku hydrofobizátoru máčením
- Obr. 48 Stanovení smáčecího úhlu pro vodu na hydrofobizovaném povrchu analýzou obrazu pořízeného fotoaparátem s makroobjektivem ($180^\circ - 71^\circ = 109^\circ$)
- Obr. 49 Experimentální fáze č. 2 – změny vlhkosti u hydrofobizovaných i nehydrofobizovaných vzorků starého smrkového dřeva ve 3. kroku experimentu – při expozici ve 3. třídě použití (průměrné hodnoty stanovené vždy na 7 vzorcích)
- Obr. 50 Experimentální fáze č. 2 – na povrchu neošetřených vzorků (vlevo) dochází k rozvoji růstu plísní
- Obr. 51 Vzorky LLD po provedení 3. experimentální fáze

- Obr. 52 Experimentální fáze č. 4 – dynamika příjmu vlhkosti u vzorků břízy v 1. kroku – 2. třídě použití (označení vzorků viz tab. 25)
- Obr. 53 Experimentální fáze č. 4 – dynamika příjmu vlhkosti u vzorků z břízy v 3. kroku – 3. třídě použití (označení vzorků viz tab. 25)
- Obr. 54 Hmotnostní ztráty Δm vzorků z borovicové běle při testu odolnosti proti dřevokazným houbám klesají s rostoucí koncentrací přípravku Lukofob 39
- Obr. 55 Silný atak hub na referenčních vzorcích z borového bělového dřeva (vzorky K uložené v miskách vlevo) a omezení ataku hub na vzorcích ošetřených přípravkem Lukofob 39 v koncentraci 100 % (vzorky L4 uložené v miskách vpravo) – stav po 6 týdnech expozice
- Obr. 56 Silná forma plísňového ataku na referenčním vzorku z borového bělového dřeva (vzorky K uložené v miskách vpravo) a částečně potlačený atak plísní u vzorků ošetřeného organosilanem při použití 100 % koncentrace přípravku Lukofob 39 (vzorky L4 uložené v miskách vlevo) - obrázky z finálního 28. dne expozice
- Obr. 57 Rozsah plísňových ataků MA u vzorků z borovicové běle klesal s rostoucí koncentrací přípravku Lukofobu 39 - výsledky z finálního 28. dne
- Obr. 58 Stanovení pevnosti dřeva v tlaku podél vláken malých bezvadých vzorků
- Obr. 59 Pevnost v tlaku σ_{12} dřeva podél vláken s 12 % vlhkostí u dřevin ošetřených přípravkem Lukofob 39 v závislosti na délce máčení
- Obr. 60 SEM snímek smrkového dřeva máčeného v přípravku Lukofob 39 po dobu 28 dnů - vznik granulovitých minerálních usazenin (a), tyto silanolátové struktury pronikají i mezi vrstvy buněčné stěny, což je dobře patrné na jejím řezu (b)
- Obr. 61 Stanovení rázové houževnatosti malých bezvadých vzorků v Charpyho kladivu
- Obr. 62 Závislost rázové houževnatosti dřeva A_{12} ošetřeného přípravkem Lukofob 39 na délce máčení (při 12 % vlhkosti testovaných těles)

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Základní způsoby modifikace rostlého dřeva [25]
- Tab. 2 Teplotní meze při termické degradaci dřeva [25]
- Tab. 3 Posouzení přirozené trvanlivosti dřevin – návod pro třídy trvanlivosti dřevin a použití v třídách ohrožení [8]
- Tab. 4 Třídy pevnosti dřeva [5]
- Tab. 5 Parametry lepeného lamelové dřeva dle ČSN EN 14080 [10]
- Tab. 6 Technické parametry prostředku Lukofob 39 [71]
- Tab. 7 Technické parametry síranu měďnatého p.a. [72]
- Tab. 8 Vybrané technické parametry přístroje VEGA TS Tescan 5130 [69]
- Tab. 9 Změny hmotnosti během máčení vzorku v roztoku přípravku Lukofob 39, Na_2SiO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro SEM
- Tab. 10 Vypočtené charakteristiky hustoty dřeva ρ , spalitelného podílu Δ_{sp} , nespalitelného podílu Δ_{nesp} , hmotnosti nespalitelného podílu m_{nesp} a koncentrace nespalitelné složky c_{nesp} u referenčních vzorků dřeva
- Tab. 11 Základní charakteristiky referenčních vzorků dřevin – průměrné hodnoty spalitelného podílu $\overline{\Delta_{sp}}$ a koncentrace nespalitelné složky dřeva $\overline{c_{nesp}}$ s příslušnými směrodatnými odchylkami $\sigma_{\Delta_{sp}}$ a $\sigma_{c_{nesp}}$
- Tab. 12 Změny hmotnosti během máčení vzorku v roztoku přípravku Lukofob 39, Na_2SiO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro termickou analýzu
- Tab. 13 Charakteristiky mineralizovaného dřeva v povrchových vrstvách – podíl minerálních částic Δ_{min} , hmotnost minerálního podílu v popelu m_{min} a koncentrace nespalitelné minerální složky c_{min}
- Tab. 14 Charakteristiky přirozeně mineralizovaných výdřev – Zlaté hory
- Tab. 15 Objemový příjem aktivní silanolové složky Al dřevěných vzorků pro experimentální stanovení vazby minerální látky na buněčnou stěnu
- Tab. 16 Objemové změny testovaných vzorků dřeva v důsledku umělé mineralizace
- Tab. 17 Změny hmotnosti vzorků profilů během jejich máčení v roztocích přípravků Lukofob 39, Na_2SiO_3 a $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro vrtnou metodu
- Tab. 18 Hodnoty vrtného odporu u referenčních vzorků dřevin
- Tab. 19 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených přípravkem Lukofob 39
- Tab. 20 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených modrou skalicí ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Tab. 21 Průměrné hodnoty vrtného odporu vzorků ošetřených vodním sklem (Na_2SiO_3)
- Tab. 22 Hodnocení vhodnosti použití aplikovaných komerčních přípravků
- Tab. 23 Příjem aktivní silanolové složky Al u jednotlivých dřevin, které byly následně použity pro hodnocení účinnosti hydrofobizace proti bobtnání
- Tab. 24 Relativní účinnost proti bobtnání $AS_{relative}$ silanolové aktivní složky Al obsažené v přípravku Lukofob 39 stanovená pro vzorky borovice a smrku v tangenciálním směru
- Tab. 25 Označení vzorků testovaných 4. experimentální faze

- Tab. 26 Příjem aktivní silanolové složky AI u vzorků borovice lesní, které byly následně použity pro hodnocení odolnosti proti dřevokazným houbám
- Tab. 27 Hmotnostní ztráty vzorků z borovicové běle ošetřené přípravkem Lukofob 39 po ataku dřevokazných hub – *Coniophora puteana*, *Serpula lacrymans* a *Trametes versicolor*
- Tab. 28 Příjem aktivní silanolové složky AI u vzorků borovice lesní, které byly následně použity pro hodnocení odolnosti proti plísním
- Tab. 29 Napadení plísní u vzorků z borovicové běle ošetřených přípravkem Lukofob 39
- Tab. 30 Příjem aktivní složky silanolu AI dřevěných vzorků pro stanovení pevnosti
- Tab. 31 Pevnost v tlaku dřeva podél vláken σ_w u těles s určitou vlhkostí v době zkoušky a pevnost v tlaku podél vláken σ_{12} po přepočtu na vlhkost 12 % pro dřevo modřínu, smrku, buku a dubu mineralizovaného 50 % roztokem přípravku Lukofob 39
- Tab. 32 Příjem aktivní silanolové složky AI vzorků dřeva pro zkoušku rázové houževnatosti
- Tab. 33 Rázová houževnatost A_w těles s určitou vlhkostí v době zkoušky a rázová houževnatost A_{12} po přepočtu na 12 % vlhkost vzorků u dřeva modřínu, smrku, buku a dubu mineralizovaného přípravkem Lukofob 39

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

Články v impaktovaném časopise:

1. DAŇKOVÁ, J., REINPRECHT, L., MURÍNOVÁ, T., MEC, P., PÁNEK, M., PLEVOVÁ, L.: Performance of Methyl-tripotassiumsilanol Treated Wood Against Swelling in Water, Decay Fungi and Moulds. *Wood Research* Vol. 58 (2013). pp. 511 – 520, ISSN: 1336-4561.

Články a příspěvky z konferencí v časopisech indexovaných v databázi WOS a Scopus

2. DAŇKOVÁ, J., MAJSTRÍKOVÁ, T., MEC, P., ŠČUČKA, J., MARTINEC, P.: *Koroze kovových spojovacích prostředků ve dřevě modifikovaném silikony*. *Koroze a ochrana materiálů*, 2015, roč. 59, č. 4, s. 114-120. ISSN: 1804-1213.
3. DAŇKOVÁ, J., MEC, P., MAJSTRÍKOVÁ, T.: *Stiffness analysis of glued connection of the timber-concrete structure*. *Open Engineering*, 2016, 6.1. ISSN: 2391-5439.
4. MAMOŇOVÁ, M., MURÍNOVÁ, T., MEC, P.: *Hodnotenie modelovej mineralizácie dreva pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie*. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen* Vol. 57 (2015). p. 15-23. ISSN: 1336–3824.
5. MURÍNOVÁ, T., MEC, P., DAŇKOVÁ, J., REZEK, P.: *Mineralization Influence on the Strength Parameter of Solid Wood*. *Advanced Materials Research* Vol. 1122 (2015), pp. 15-18. ISBN 978-3-03835-506-9.
6. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., MAMOŇOVÁ, M., REINPRECHT, L.: *Modifikace dřeva silikony jako potenciálně perspektivní technologie ochrany dřevěných stavebních konstrukcí proti korozi*. *Koroze a ochrana materiálů* Vol. 58 (2014). p. 107-112. ISSN: 1804-1213.
7. MURÍNOVÁ, T., MAMOŇOVÁ, M., MEC, P., DAŇKOVÁ, J., REZEK, P.: *Application of Scanning Electron Microscopy for the Purposes of Mineralized Wood Survey*. *Advanced Materials Research* Vol. 1000 (2014), pp. 251-256. ISBN: 978-3-03835-188-7.
8. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., MEC, P.: *The Existing Timber Structures - Possibilities and Limits of Diagnostic Methods in Assessment Process*. *Advanced Materials Research* Vol. 923 (2014), pp. 17-24. ISBN: 978-3-03835-083-5.
9. MURÍNOVÁ, T., DAŇKOVÁ, J., MEC, P.: *Utilization of Wood Modification for the Purpose of Moisture Volume Changes Reduction*. *Advanced Materials Research* Vol. 923 (2014), pp. 25-30. ISBN: 978-3-03835-083-5.
10. MEC, P., MURÍNOVÁ, T., KUBEČKA, K.: *Possibilities of Thermal Analysis for the Evaluation of Construction Materials*. *Advanced Materials Research* Vol. 899 (2014), pp. 425-430. ISBN: 978-3-03835-040-8.
11. MEC, P., KHESTL, F., MURÍNOVÁ, T., BOHÁČOVÁ, J.: *Thermoanalytical study of binders containing pozzolanic and latent hydraulic materials*. *Advanced Materials Research* Vol. 897 (2014), pp. 21-24. ISBN: 978-3-03835-026-2.
12. MEC, P., DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T.: *Modeling of historical timber roof truss of Želiv monaster*. *Advanced Materials Research* Vol. 688 (2013), pp. 201-206. ISBN: 978-3-03785-679-6.

Články a příspěvky z konferencí v recenzovaných časopisech

13. MEC, P., MURÍNOVÁ, T., KUBEČKA, K.: *Možnosti využití termické analýzy v oblasti stavebních materiálů*. Stavební obzor 2/2013, pp. 39 – 43. ISSN: 1210-4027.
14. DAŇKOVÁ, J., ŠMÍRA, P., MURÍNOVÁ, T.: *Vlhkostní chování starého jedlového dřeva*. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební XI. /2., 2011, pp. 75-80. ISSN: 1213-1962.
15. ŠMÍRA, P., MURÍNOVÁ, T., ŠTĚPÁNEK, J.: *Využití ultrazvukového přístroje PUNDIT pro zjišťování stavu dřeva v konstrukcích*. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební XI. /2., 2011, pp. 175-180. ISSN: 1213-1962.

Kapitoly v odborných knihách

16. VOJVODÍKOVÁ, B., MURÍNOVÁ, T., KHESTL, F., KUDA, F., BERÁNKOVÁ, E., PETŘÍKOVÁ, D., LADZIANSKA, Z., KUČTOVÁ, R., SCHEJBALOVÁ, B., MARKOVÁ, B., TICHÁ, I., ŠOBÁŇOVÁ, P., NEDVĚD, M., SEJKOVÁ, A.: *Brownfieldy - a co s nimi souvisí*. Praha: European Science And Art Publishing, 2014. ISBN: 978-80-87504-23-9.
17. ZAMARSKÝ, V., PONICKÝ, P., KALOČ, M., VOJVODÍKOVÁ, B., MURÍNOVÁ, T.: *Technologie a sektory tvorby hodnoty výrobků a služeb*. Ostrava: VŠP a.s., 2014.
18. VOJVODÍKOVÁ, B., JEMELKA, M., MARTINÁT, S., DVOŘÁK, P., KLUSÁČEK, P., KUNC, J., FRANTÁL, B., MURÍNOVÁ, T., KHESTL, F., STOLÁRIK, M., PINKA, M., NEDVĚD, M., PETEROVÁ, J., ENDEL, S., MARKOVÁ, B., TICHÁ, I., ROHÁČ, O., MACEČKOVÁ, B., BURGERMEISTEROVÁ, R., JALŮVKA, L., JELÍNEK, P., MATĚJKA, D.: *Brownfieldy - cesta od minulosti do budoucnosti*. Praha: European Science And Art Publishing, 2013. ISBN: 978-80-87504-22-2.
19. VOJVODÍKOVÁ, B., MURÍNOVÁ, T., PETEROVÁ, J.: *Different concept of Education and Cooperation on Brownfields*, In: *Innowacyjne Rozwiązania Revitalizacji Terénov Zdegradovaných*. Katowice: Centrum Badań Dozoru Górnictwa Podziemnego, 2013, pp: 109 – 115. ISBN: 978-83-930319-9-3.
20. PETŘÍKOVÁ, D., VOJVODÍKOVÁ, B., SAMSON, N., BERGATT JACKSON, J., FINKA, M., TOPTCHIYSKI, S., RUSU, O. C., ZÚBKOVÁ, M., GRIGOROVSKI, M., LADZIANSKA, Z., TOPTCHIYSKA, D., PLETNICKÁ, J., JAMEČNÝ, L., CIOLACU, D., JAŠŠO, M., BLÁHA, P., MATUROVÁ, M., LUKŠ, J., KRALCHEVSKA, A., MURÍNOVÁ, T., BERGATT, W.: *Brownfields - Manual BROWNTRANS*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN: 978-80-248-3119-0.
21. PETŘÍKOVÁ, D., VOJVODÍKOVÁ, B., SAMSON, N., BERGATT JACKSON, J., FINKA, M., TOPTCHIYSKI, S., RUSU, O. C., ZÚBKOVÁ, M., GRIGOROVSKI, M., LADZIANSKA, Z., TOPTCHIYSKA, D., PLETNICKÁ, J., JAMEČNÝ, L., CIOLACU, D., JAŠŠO, M., BLÁHA, P., MATUROVÁ, M., LUKŠ, J., KRALCHEVSKA, A., MURÍNOVÁ, T., BERGATT, W.: *Izostaveni industrialni zoni Narčnik- BROWNTRANS*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN: 978-80-248-2893-0.
22. PETŘÍKOVÁ, D., VOJVODÍKOVÁ, B., SAMSON, N., BERGATT JACKSON, J., FINKA, M., TOPTCHIYSKI, S., RUSU, O. C., ZÚBKOVÁ, M., GRIGOROVSKI, M., LADZIANSKA, Z., TOPTCHIYSKA, D., PLETNICKÁ, J., JAMEČNÝ, L., CIOLACU, D., JAŠŠO, M., BLÁHA, P., MATUROVÁ, M., LUKŠ, J., KRALCHEVSKA, A., MURÍNOVÁ, T., BERGATT, W.: *Brownfields - Handbook BROWNTRANS*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN: 978-80-248-2893-0.
23. VOJVODÍKOVÁ, B., MURÍNOVÁ, T., KHESTL, F., MARKOVÁ, B., TICHÁ, I., PACLOVÁ, H., WALICA R., PETEROVÁ, J., ENDEL, S., KUDA, F., KOLEČEK, M.,

KOLEČKOVÁ, Z., RUBIŠAROVÁ, K., ZEZULA, K., KISZKA J.: *Brownfields - specifika, okolí a ideje*. Praha: Professional Publishing, 2012. ISBN: 978-80-7431-100-0.

Další publikace

24. MAJSTRÍKOVÁ, T.: *Experimentální ověření vazby organosilanu na buněčnu stěnu dřeva*. ÚGN - Ph.D. workshop 2015: proceedings: Ostrava, December 10, 2015. s. 46-49. ISBN: 978-80-86407-62-3.
25. MURÍNOVÁ, T.: *Hodnocení vlivu mineralizace na pevnost rostlého dřeva*. ÚGN - Ph.D. workshop 2014: proceedings: Ostrava, December 9, 2014, s. 34-37. ISBN: 978-80-86407-52-4.
26. MURÍNOVÁ, T., MAMOŇOVÁ, M., MEC, P.: *Hodnocení mineralizace dřeva pomocí skenovací elektronové mikroskopie*. CONSTRUMAT 2014: Ostrava, 11. - 13. 6. 2014, pp. 132 – 139. ISBN: 978-80-248-338.
27. DAŇKOVÁ, J., MEC, P., MURÍNOVÁ, T., KHESTL, F.: *Nedestruktivní diagnostické metody pro posouzení stávajících dřevěných konstrukcí*. Structura 2013: III. ročník mezinárodní stavební konference: Ostrava, 7.-8.11.2013, pp. 33-38. ISBN: 978-80-248-3236-4.
28. DAŇKOVÁ, J., MEC, P., MURÍNOVÁ, T., HOLOUBEK P. *Diagnostika a hodnocení konstrukcí dřevěných krovů*. Střechy, fasády izolace 19 (2012), Ostrava, pp. 24-26. ISSN: 1212-0111.
29. KHESTL, F., DAŇKOVÁ, J., MEC, P., MURÍNOVÁ, T.: *Současný trend moderního stavitelství*. Structura 2012, pp. 222-227. ISBN: 978-80-248-2879-4.
30. MEC, P., MURÍNOVÁ, T., BOHÁČOVÁ, J.: *Pojivové systémy s experlitovým plnivem*. Maltoviny 2012, pp. 64 – 69. ISBN: 978-80-214-4657-1.
31. MURÍNOVÁ, T.: *Efektivní aplikace nedestruktivních diagnostických metod pro hodnocení dřevěných konstrukcí*. ÚGN - Ph.D. workshop 2012: proceedings: Ostrava, December 5, 2012, pp. 38-43. ISBN: 978-80-86407-31-9.
32. VOJVODÍKOVÁ, B., MURÍNOVÁ, T., PETEROVÁ, J.: *Access to Brownfields slightly different*. CABERNET 2012, pp. 50 – 56.
33. DAŇKOVÁ, J., KHESTL, F., MEC, P., MURÍNOVÁ, T.: *Hodnocení a analýza stávajících dřevěných konstrukcí*. Structura 2011, pp. 64-73. ISBN: 978-80-248-2521-2.
34. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T.: *Hydrofobizace dřeva*. Zpravodaj WTA CZ 3/2011, pp. 31-34. ISSN 1213-7308.
35. MURÍNOVÁ, T.: *Hydrofobizace povrchu dřeva*. Moderní stavební materiály a jejich využití 2011, pp. 39-48. ISBN: 978-80-248-2497-0.
36. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., HÖCHSMANN, T.: *Úprava vlastností dřeva povrchovou hydrofobizací*. Sanace a rekonstrukce staveb 2011, pp. 23-25. ISBN: 978-80-02-02344-9.
37. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., SEKANINA, D.: *Dřevobetonové stropní konstrukce v historických objektech*. Sanace a rekonstrukce staveb 2010, Brno, pp. 226-231. ISBN: 978-80-02-02273-2.
38. MEC, P., VAVRO, M., MURÍNOVÁ, T. *Metakaolín jako pucolánová příměs zlepšující užité vlastnosti vápenných malt*. Maltoviny 2010, Brno, pp. 99-105. ISBN: 978-80-214-4204-7.

Patenty, užité vzory, software

39. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., MEC, P., MENCL, V.: *Užitný vzor č. 25368 - Kompozitní dřevobetonový spřažený stropní nosník*, zapsán 13.5.2013
40. DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T., MEC, P. a MENCL, V. *Kompozitní dřevobetonový spřažený stropní nosník: (EN) Cased composite cement-wood overhead beam*. Česká republika. 2013-187 Zveřejněná patentová přihláška.
41. MEC, P., BROŽOVSKÝ, J., DAŇKOVÁ, J., MURÍNOVÁ, T.: *Software WRT 1.0 = Software Wood Resistograph Test*, 2013.

ÚČAST NA PROJEKTECH

1. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 – OP Výzkum a vývoj pro inovace – Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin – vědecky pracovník – Ph. D. student
2. CZ.1.07/1.3.05/02.0026 – Rozvoj profesního vzdělávání pedagogů středních odborných škol a učilišť v oblasti dřevovýroby a stavebnictví – lektor
3. CZ.1.07/2.3.00/20.0013 – Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO – člen výzkumného týmu katedry Stavebních hmot a hornického stavitelství
4. CZ.1.07/2.4.00/17.0033 – Partnerství pro české brownfieldy – koordinátor praxí, supervize praxí, workshopů
5. CZ.1.07/2.2.00/28.0260 – Inovace studijního programu Stavební Inženýrství – lektor
6. CZ.1.07/2.3.00/45.0021 – Zlepši si techniku – část Stavby budoucnosti – lektor
7. Projekt č. 11310 1614 – Brownfield Regeneration Know-How Transfer – Lifelong Educational Project BROWNTRANS - tvorba výukových textů
8. SP 2011/203 – Fyzikální vlastnosti stavebních materiálů a jejich vliv na predikci přídatných zatížení v konstrukci – člen výzkumného týmu
9. SP 2012/128 – Vysoce pórovité stavební materiály a materiály s velmi nízkou objemovou hmotností – člen výzkumného týmu
10. SP2013/72 – Využití mineralizace dřeva jako environmentálně přijatelné metody ochrany dřevěných konstrukcí – řešitel projektu
11. SP2014/134 Mineralizace rostlého dřeva organokřemičitany a její vliv na vybrané fyzikálně - mechanické vlastnosti ošetřeného materiálu – řešitel projektu
12. SP2014/94 Experimentální analýza dřeva s impregnační lazurou a zjišťování degradace dřeva umístěním do urychlovače stárnutí – spoluřešitel projektu
13. FRVS2014/10 Škola hrou - Učit se učením – řešitel projektu
14. FRVS2014/32 Inovace předmětu Zkušebnictví a řízení jakosti staveb – spoluředitel projektu