



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ**

INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERING

**STUDIUM TEPLOTNĚ VLHKOSTNÍCH PROCESŮ  
V KONSTRUKCÍCH MODERNÍCH DŘEVOSTAVEB**

TEMPERATURE MOISTURE PROCESS STUDY IN MODERN WOOD STRUCTURES

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. et Ing. Jakub Dohnal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jan Pěnčík, Ph.D.**

**BRNO 2021**

**Klíčová slova**

borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), smrk ztepilý (*Picea abies* L.), vlhkost, ABAQUS, mikrovlnné vysoušení, gravimetrická metoda

**Keywords**

Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), Norway spruce (*Picea abies* L.), moisture, ABAQUS, microwave drying, gravimetric method

# OBSAH

<b>A</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>B</b>	<b>SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	<b>8</b>
B.1	VODA VE STRUKTUŘE DŘEVA .....	9
B.2	DIFÚZNÍ MODELY POPISUJÍCÍ PROSTUP VODY VE DŘEVĚ.....	11
B.2.1	<i>Difúzní model Nilsson &amp; Sandberg</i> .....	11
B.3	POPIS TRANSPORTU VODY VE DŘEVĚ .....	12
<b>C</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>12</b>
<b>D</b>	<b>MATERIÁL A METODIKA</b> .....	<b>13</b>
D.1	EXPERIMENT 1 (EX1) - STANOVENÍ VYBRANÝCH MECHANICKÝCH A ELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ ZVOLENÝCH DŘEVIN .....	13
D.1.1	<i>Mechanické testování</i> .....	16
D.1.1.1	Stanovení lokálního modulu pružnosti v ohybu (MOE) .....	18
D.1.1.2	Pevnost v ohybu MOR .....	18
D.1.1.3	Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $f_{c,0}$ .....	19
D.2	EXPERIMENT 2 (EX2) – EXPERIMENT VYSOKÉHO NAVLHÁNÍ A NÁSLEDNÉHO VYSOUŠENÍ POMOCÍ EMW .....	20
D.3	MODELOVÁNÍ STRUKTURY DŘEVA POMOCÍ PROGRAMU ABAQUS.....	21
<b>E</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>22</b>
E.1	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EX1 .....	22
E.1.1	<i>Druhy porušení při čtyřbodovém ohybu</i> .....	22
E.1.2	<i>Druhy porušení při tlakových zkouškách</i> .....	24
E.1.3	<i>Výsledné hodnoty získané z experimentu EX1</i> .....	25
E.1.4	<i>Porovnání lokálního ohybového modulu E pro všechny série</i> .....	26
E.1.5	<i>Výsledky tlaku rovnoběžně s vlákny <math>f_{c,0}</math> pro všechny série</i> .....	28
E.2	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EX2 .....	29
<b>F</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
F.1	PŘÍNOS PRO PRAXI .....	32
F.2	PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU .....	33
F.2.1	<i>Využití poznatků pro zpřesnění numerických modelů</i> .....	33
<b>G</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>34</b>

---

## Představení autora

### Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Ing. et Ing. Jakub Dohnal  
Adresa: Axmanova 4, 623 00 Brno-Kohoutovice  
Telefon: 734 418 127  
E-mail: dohnal.j@fce.vutbr.cz  
Státní příslušnost: česká  
Datum narození: 7. 12. 1989



### Vzdělání:

2015 – doposud Vysoké učení technické v Brně – obor pozemní stavitelství (doktorské studium)  
2013 – 2015 Vysoké učení technické v Brně – obor pozemní stavitelství (magisterské studium)  
2012 – 2014 Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava – obor důlní měřictví (magisterské studium)  
2009 – 2013 Vysoké učení technické v Brně – obor pozemní stavitelství (bakalářské studium)  
2009 – 2012 Vysoké učení technické v Brně – obor geodezie a kartografie (bakalářské studium)  
2005 – 2009 Střední škola stavební Jihlava – obor Technické lyceum

### Schopnosti, znalosti a dovednosti:

Absolvované kurzy: Specializační studium technického zručnosti pro pracovníky znaleckých ústavů na VUT v Brně  
Expertní kurz navrhování pasivních a nulových domů  
Kurz problematiky dřevěných staveb

Autorizace: 1007128 IP00

Jazykové znalosti: angličtina – B2, němčina – A2

Řidičský průkaz: A, B, B+E

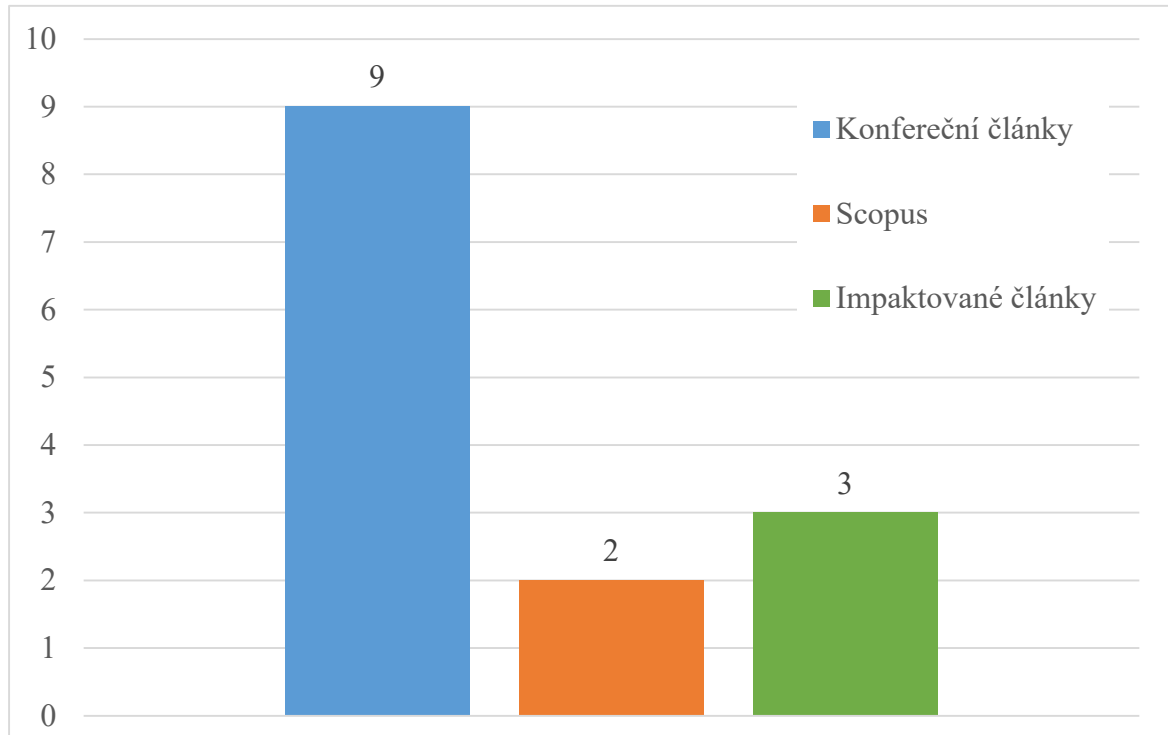
Zbrojní průkaz: A, B, C, E

## SEZNAM PUBLIKOVANÝCH ČLÁNKŮ AUTORA

- A KUČERA, R.; POSPÍŠIL, J.; DOHNAL, J.; BEČKOVSKÝ, D. Současné možnosti výzkumu stavebně fyzikálních vlastností konstrukcí dřevostaveb na VUT v Brně. In *Dřevostavby 2016. Vyšší odborná škola Střední průmyslová škola. Volyně. Volyně: Vyšší odborná škola a střední průmyslová škola. Volyně, 2016. s. 45-54. ISBN: 978-80-86837-84-0.*
- B DOHNAL, J.; PĚNČÍK, J. Analysis of thermal – moisture problems in massive wooden sandwich structures. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 2016, no. 824, p. 563-570. ISSN: 1662-7482.
- C LAVICKÝ, M.; PĚNČÍK, J.; DOHNAL, J.; BEČKOVSKÝ, D.; BEČKOVSKÁ, T. Static numeric and experimental analysis of prefabricated winder wooden staircase with central stringer made from scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *WOOD RESEARCH*, 2016, vol. 61, no. 4, p. 553-564. ISSN: 1336-4561, [IF = 1,139 (2016), Q2].
- D DOHNAL, J. Analýza přijímání vlhkosti dřeva. In *Juniorstav 2016*. Brno: VUT v Brně, FAST, 2016. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5311-1.
- E DOHNAL, J.; HRADIL, P.; PĚNČÍK, J. Hygrothermal simulation of wood exposed to the effect of external climate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 245, no. 1, p. 1-7. ISSN: 1757-899X.
- F DOHNAL, J.; PĚNČÍK, J. Analýza vlivu elektromagnetických vln na vysychání dřeva a na rozložení vlhkostního pole. In *DŘEVOSTAVBY, Sborník přednášek z odborného semináře se zahraniční účastí*. Volyně: Volyně, 2017. s. 111-119. ISBN: 978-80-86837-87-1.
- G HRADIL, P.; FORTINO, S.; METALLI, G.; MUSCI, A.; DOHNAL, J.; FREDRIKSSON, M. *Simulation of moisture diffusion in timber bridges exposed to rain*. Skelleftea: ICTB 2017: 3rd International Conference on Timber Bridges, 2017. p. 1-12.
- H DOHNAL, J. NUMERICKÁ SIMULACE HYGROTERMÁLNÍCH JEVŮ DŘEVĚNÉHO VZORKU VYSTAVENÉHO KLIMATICKÝM PODMÍNKÁM. In *Sborník*. 2017. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5473-6.
- I DOHNAL, J.; PĚNČÍK, J. Analýza vlivu elektromagnetických vln na vysychání dřeva a na rozložení vlhkostního pole. *TZB-info*, 2018, č. x, s. 1-8. ISSN: 1801-4399.
- J DOHNAL, J. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLHKOSTNÍCH JEVŮ NA DŘEVĚNÝCH VZORCÍCH VYSTAVENÝCH KLIMATICKÝM PODMÍNKÁM. In *Sborník příspěvků*. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2018. s. 70-76. ISBN: 978-80-86433-69-1.
- K DOHNAL, J. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ VYBRANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SMRKU ZTEPILÉHO (*PICEA AMBIES* L.). In *Sborník příspěvků*. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2019. s. 57-62. ISBN: 978-80-86433-71-4. 2018 - 20. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno (25.01.2018)
- L DOHNAL, J. Fire resistance of surface charred beech wood. 2021, konference WWD online.
- M MACHOVÁ, D.; OBERLE, A.; ZÁRYBNICKÁ, L.; DOHNAL, J.; ŠEDA, V.; DÖMENY, J.; VACENOVSKÁ, V.; KLOIBER, M.; PĚNČÍK, J.; TIPPNER, J.;
-

ČERMÁK, P. Surface Characteristics of One-Sided Charred BeechWood. *Polymers*, 2021, vol. 7, no. 12, p. 1-15. ISSN: 2073-4360 [IF = 4,329 (2020), Q1].

N ŠEDA, V.; MACHOVÁ, D.; DOHNAL, J.; DÖMENY, J.; ZÁRYBNICKÁ, L.; OBERLE, A.; VACENOVSKÁ, V.; ČERMÁK, P. Effect of One-Sided Surface Charring of BeechWood on Density Profile and SurfaceWettability. *Applied Sciences - Basel*, 2021, vol. 11, no. 4086, p. 1-10. ISSN: 2076-3417 [IF = 4,329 (2020), Q1].



Obr. 1: Publikované články z toho impaktované články 2x Q1 a 1x Q2.

---

## A ÚVOD

Dřevo provází člověka od začátku existence a bylo jedním z prvních materiálů, které člověk používal, aby lépe přežíval a prosperoval. Za použití dřeva vyráběl jednoduché nástroje [17]. Dřevo bylo jedním z prvních materiálů, které člověk dokázal využívat, a také je používal ke stavbě svých obydlí [35]. V prvopočátcích používání dřeva byly používány celé kmeny bez opracování, jak je vidět na obydlích datujících se od období 120 000 – 10 000 př. n. l.

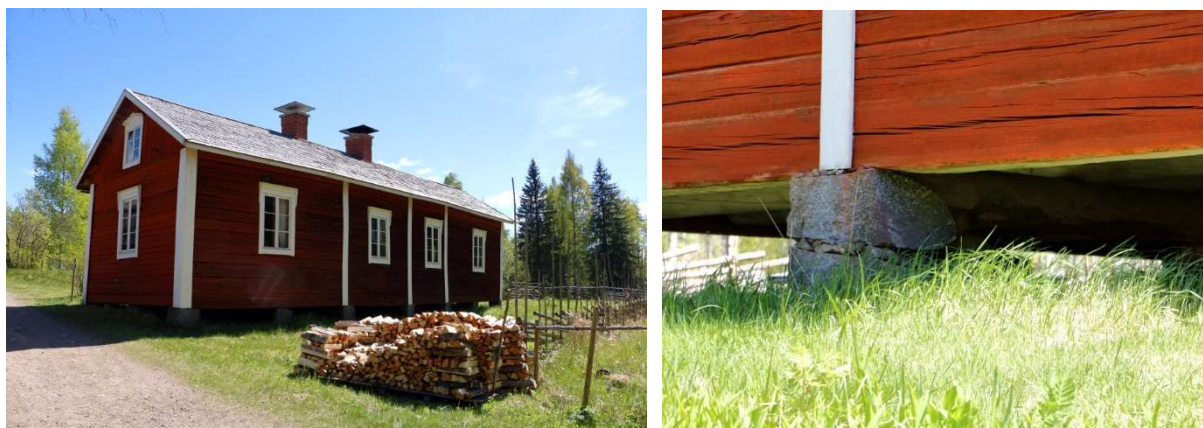
Postupem času, díky rozvoji zpracování jiných materiálů [17], hlavně kovu [16] a [29], vznikaly další možnosti úpravy a využití dřeva. Díky jeho lepšímu zpracování a opracování vznikaly stavby, které se již více podobaly stavbám, které známe do dnešní doby a stavíme je stále, jak uvádí Hladík v literatuře [18]. Vývojem docházelo také k změnám ve skladbách konstrukcí stěn. Z počátku se na sebe vrstvily jednotlivé klády, které se postupem času upravovaly drážkami [15] pro lepší spojení a větší těsnost stavby.



Obr. 2: Stará roubenka ve Valašském muzeu v přírodě v Rožnově pod Radhoštěm. Zdroj autor.

Již naši předkové sledováním věděli, že chování a vlastnosti dřeva jsou ovlivňované okolním prostředím a vymýšleli různé stavební i jiné úpravy jak dřevo ochránit. Domy stavěli s velkými přesahy střech [20], aby byla dřevěná konstrukce stěn co nejvíce chráněná před deštěm a tím byla prodloužena jejich životnost. Dřevo se natíralo krví volů, aby déle vydrželo [21]. Domy stavěli v místě styku se zemí buď na kůlech nebo pilířích, tak jak je vidět na

(Obr. 3). Případně se spodní část stěny domu postavila z více odolného materiálu, např. kamene.



Obr. 3: Dřevostavba na kamenných pilířích ve Finsku. Zdroj autor.

Jinak tomu není ani dnes. Stavby ze dřeva nebo z kompozitu využívajícího dřevo jsou v současné době velice populární. Staví se celé konstrukce z klád, jako je tomu u srubů nebo z trámů, jak je tomu u roubenek. Častěji se však navrhují a staví stavby, u kterých je dřevo konstrukčním materiálem s upraveným povrchem stěn tzn. dřevostavby. Současné dřevostavby díky velkému rozvoji povrchových úprav nelze často odlišit od „klasických“ zděných staveb.

V konstrukcích pezemních staveb lze dřevo použít při výstavbě nákupních hal, sportovišť nebo bytových domů. V zahraničí jsou tyto konstrukce běžnou součástí všech typů staveb a jejich obliba stále roste. U nás zatím tento trend není z důvodů přísných požárních norem, které neumožňují podobné typy staveb stavět. Proto se v České republice dřevo považuje spíše za druhotný stavební materiál a používá se při výstavbě rodinných domů.

U všech staveb ať malých nebo velkých, které jsou ze dřeva nebo jejich kompozitů je nutné uvažovat s tím, že je dřevo přírodní materiál, který mění své vlastnosti v závislosti na vlhkosti. Vlivem vlhkosti ve struktuře dřeva dochází k řadě změn od rozměrových, přes mechanické až po barevnostní. Změny mechanické a elastické s ohledem na měnící se vlhkost jsou hlavní částí této práce.

## B SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Vlhkostí ve dřevě se zabývá spousta výzkumných týmů po celém světě. Je to způsobeno značnou oblibou dřeva jako stavebního materiálu i s ohledem na jeho dostupnost, a také na velice nízké emisní stopy při jeho použití. Některé výzkumné týmy se snaží najít možnost, jak konstrukčně ochránit dřevo, aby nedocházelo k jeho nadměrnému navlhání [13]. Jiné týmy se

snaží ochránit historické památky před jejich dalším napadením biotickými činiteli jak je např. uvedeno v [28] a [32].

Pro práce vyžadující vyšší přesnost se dřevem je důležité stanovit vlhkost obsaženou ve struktuře dřeva, např. při numerických výpočtech, stanovení mechanické odolnosti apod. Vlhkost lze stanovit několika způsoby. V případě potřeby stanovení hodnoty relativní vlhkosti dřeva pro rovnovážnou vlhkost vzduchu lze použít vztah (1) uvedený v [26] nebo [27]. Ve vztahu (1) je  $T$  teplota [K],  $w$  relativní vlhkost vzduchu [-] a  $w_{air}$  rovnovážná vlhkost [-].

$$w_{air} = 0,01 \left( \frac{-T \cdot \ln(1-w)}{0,13 \left( \frac{1-T}{647,1} \right)^{-6,46}} \right)^{\frac{1}{100 \cdot T^{-0,75}}} \quad (1)$$

Rovnovážná vlhkost je dle [2], [3] a [4] popsána vztahem (1), který je závislý na teplotě, vlhkosti a dalších faktorech, kterými může být např. přesnost vstupní hodnoty, jak je vysvětleno v (Tab. 1).

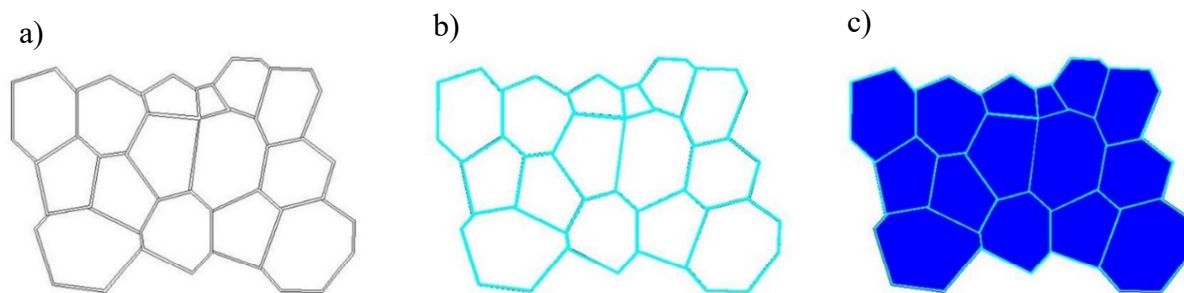
V (Tab. 1) jsou uvedeny rozdíly, které nastanou pro výsledné hodnoty rovnovážné vlhkosti  $w_{air}$  v případě, když dojde pouze ke změně relativní vlhkosti okolního vzduchu a teplota vzduchu zůstane stejná a to 0 °C. Ve spodní části tabulky je nazačen stav jak se bude měnit rovnovážná vlhkost vzduchu  $w_{air}$  v závislosti na zadané přesnosti relativní vlhkosti okolního vzduchu.

Tab. 1: Stejná teplota  $T = 0$  °C a různé vlhkosti  $w_{air}$ .

$T$ [K]	$T$ [°C]	$w$ [%]	$w_{air}$ [%]
273,15	0	99	31,245
		99,9	40,026
		99,99	47,715
		99,999	54,683
		99,9999	61,125
		99,99999	67,160

## B.1 Voda ve struktuře dřeva

Hlavní součástí všech živých buněk je voda. Voda se ve struktuře dřeva rozlišuje podle toho, kde se vyskytuje. Podle [12], [24] a [34] je možné vodu rozdělit na vodu volnou, vázanou a vodu chemicky vázanou. Schématické znázornění vody ve struktuře dřeva je naznačeno na (Obr. 4).



Obr. 4: Schématické znázornění obsahu vody ve struktuře vody a) pouze chemicky vázaná voda, b) voda vázaná a c) voda vázaná i volná.

Pokud je voda vázaná na své maximální hranici a voda volná se ve struktuře dřeva vůbec nevyskytuje, tak lze tento stav podle [12] a [34] definovat jako bod nasycení vláken (*BNV*). Tento bod jiné zdroje např. [19] označují termínem mez nasycení buněčných stěn (*MNBS*). *BNV* je velice důležitá hranice, protože nad tímto bodem se dřevo podle [12] a [34] objemově nemění. Tento rozdíl je dobře patrný a je schématicky zobrazen na (Obr. 4). Při dosažení *BNV* nebo jeho překročení je velmi obtížné numericky modelovat hygrotermální chování ve dřevě z důvodů nedostatečného matematického popisu. *BNV* je závislý na teplotě a druhu dřeviny podle [12]. Dle [19] se *BNV* u našich dřevin pohybuje v rozmezí 22 % – 35 %, které závisí na druhu dřeviny a je ovlivněna např. hustotou, chemickou stavbou apod.

Podle [23] se vlivem zvyšujícího se obsahu vody ve struktuře dřeva se snižují mechanické a elastické vlastnosti dřeva. Uvedené změny jsou blíže popsány v [23], a lze je zjednodušeně popsat touto závislostí – klesne-li (stoupne-li) vlhkost dřeva o 1 % pod bod nasycení vláken, stoupne (klesne) pevnost dřeva dle (Tab. 2)

Tab. 2: Změny vybraných vlastností u dřeva vlivem vlhkosti. Převzato z [23].

Pevnost v ohybu (statická)	asi o 4 %
Modul pružnosti $E_{  }$ , určený ze zkoušek v ohybu	asi o 2 %
Pevnost v tlaku $f_{c,  }$	asi o 6 %
Pevnost ve smyku $f_{  }$	asi o 3 %
Pevnost v tahu $f_{t,\perp}$	asi o 1,5 %

Index  $||$  v tabulce (Tab. 2) znamená zkoušení ve směru podélném (*L*) a index  $\perp$  označuje zkoušení ve směru radiálním (*R*) a tangenciálním (*T*).

## B.2 Difúzní modely popisující prostup vody ve dřevě

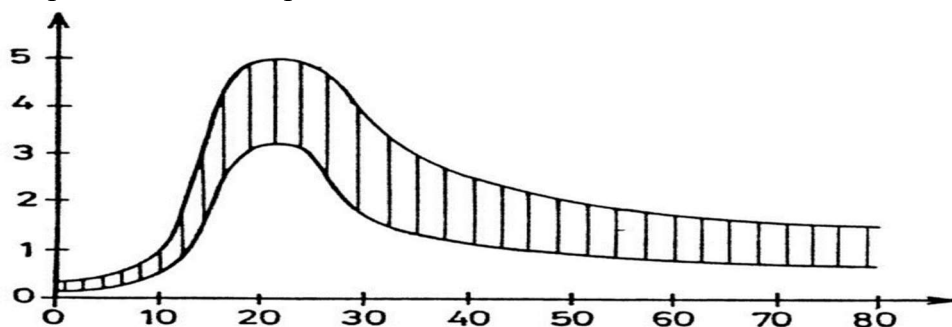
S ohledem na složitou strukturu dřeva a jeho mechanického chování je snaha nalézt zjednodušené matematické modely, které by co nejdříve popisovaly chování dřeva a přitom příliš nezatěžovaly výpočetní čas [11].

Kromě elastických a materiálových konstant potřebných pro popis mechanického chování dřeva je nutné pro správný popis uvažovat i jeho vlhkost. Vliv vlhkosti se zahrnuje sorpčními křivkami. Existuje větší množství sorpčních křivek založených na různých matematických základech a jejich vzájemnou korelací s experimenty. Sorpční křivky lze dle [19] považovat za vhodně korelující s experimenty – Langmuir, Dent a BET, všechny jsou popsány dle [19]. Velice dobře použitelná je i křivka stanovená z rovnovážné vlhkosti dřeva, která je definována vztahem (1), který je uveden [27]. Některé z difúzních modelů jsou stanoveny z matematických předpokladů jako je tomu u difúzního modelu Toratti [37]. Jiné sorpční křivky byly stanoveny z experimentálního měření např. Nilsson & Sandberg [30] a Jönssonem [27]. Model Sjödin a Toratti [37] je stanoven do hranice bodu nasycení vláken tj. do 28 % vlhkosti. Nad tímto bodem je chování vody velice těžko matematicky popsatelné, protože se voda vyskytuje ve více fázích. Model Nilsson & Sandberg [30] je definovaný až do 80 % vlhkosti dřeva. Obsahuje tedy popis chování vody nad bodem nasycení vláken.

Pro numerické použití jsou potřeba vždy všechny tři směry – radiální ( $R$ ), tangenciální ( $T$ ) a podélný ( $L$ ), proto je potřeba jednotlivé modely mezi sebou kombinovat. Vznikají tak složené modely Jönsson – Sjödin, Toratti – Sjödin apod.

### B.2.1 Difúzní model Nilsson & Sandberg

Difúzní model Nilsson & Sandberg je definovaný až do 80 % relativní vlhkosti dřeva [30]. Hodnoty byly experimentálně stanoveny a jsou zobrazeny na (Obr. 5), který je převzat z [30]. Obrázek vychází z experimentálního měření. Pro tento model nebyl autory stanoven žádný vztah, proto došlo k interpolaci hodnot difúzních koeficientů z tohoto obrázku.



Obr. 5: Experimentální výsledky difúzního modelu Nilsson & Sandberg.  
Převzato z [30].

## B.3 Popis transportu vody ve dřevě

Transport vody ve dřevě lze popsat buď jednofázovým modelem, který se v anglické literatuře označuje jako „Single phase model“, [13] a [22] nebo pomocí více fázového modelu, v anglické literatuře označovaný jako „Multi phase model“, popsáno v [14] a [25]. Pro přesnější popis transportu vody ve dřevě je potřebné znát teplotu okolí. Jednofázový model používá různá zjednodušení pro výpočet. Mezi tato zjednodušení patří například využití stejné křivky jak pro sorpci, tak i desorpci. Jednofázový model postrádá hysterezi. Dalším zjednodušením je počet použitých popisných vztahů nebo využití sorpční křivky jen na povrchu dřeva a vnitřní transport vody ve struktuře dřeva zajišťuje difúzní model implementovaný do numerického výpočtu.

## C CÍLE PRÁCE

Pro výzkum v rámci řešení témata disertační práce byly zvoleny nejčastější a nejpoužívanější dřeviny, které se vyskytuje v biotopu České republiky např. dle [36]. Volba byla provedena i s ohledem na co největší využití získaných výsledků v praxi. Nejpoužívanějším dřevinou na konstrukční účely pozemních staveb jsou podle [36] měkké jehličnaté dřeviny, tj. smrk ztepilý (*Picea abies* L.) a borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Cíle disertační práce zpracované na téma Studium teplotně vlhkostních procesů v konstrukcích moderních dřevostaveb jsou:

- 1) rozvinutí a upřesnění popisu hygrotermálního chování dřeva,
- 2) numericky i experimentální testování vybraných mechanických a elastických vlastností dřeva při zvýšené vlhkosti s numerickou verifikací,
- 3) studium vlivu elektromagnetického záření (EMW) na vysoušení vzorků s vysokou vlhkostí a maximalizovat eliminaci výsušných trhlin se studiem změn mechanických a elastických vlastností dřeva.

Zvolené cíle, tj. body 1 až 3 disertační práce ověřují teoretické znalosti doplněné o experimentální testy pro možnost využití při rekonstrukcích pozemních staveb.

## D MATERIÁL A METODIKA

Pro splnění cílů disertační práce byly sestaveny dva experimenty, které jsou v textu práce označeny jako EX1 a EX2:

- EX1 – experiment pro stanovení vybraných mechanických a elastických vlastností,
- EX2 – experiment zjišťující chování dřeva zvlhčeného vysoko nad *BNV* a jeho následném vysoušení pomocí EMW.

Kromě experimentálního zkoušení bylo pro splnění cílů disertační práce použito i numerické modelování. Numerické modelování bylo převážně realizováno na dvou zahraničních stážích v Helsinkách ve Finsku při řešení evropského projektu Durable Timber Bridges. Naměřená data byla převzata z již provedených experimentů, autorem disertační práce bylo provedeno numerické modelování, vyhodnocení a porovnání výpočtů s naměřenými hodnotami.

### D.1 Experiment 1 (EX1) - Stanovení vybraných mechanických a elastických vlastností zvolených dřevin

Experiment je zaměřený na stanovení experimentálních hodnot modulu pružnosti v ohybu (MOE), pevnosti v ohybu (MOR) a v pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny za předem stanovených vlhkostí dřeva. Takto zjištěné hodnoty lze následně využít v numerickém modelování. Běžně se pro numerické výpočty používají hodnoty, které jsou stanovené pro vlhkosti dřeva v rozmezí 10 – 12 % jak je např. uvedeno v [19]. Při použití přesnějších hodnot získaných z experimentů do numerických výpočtů se zvýší přesnost výsledků.

Experiment 1 (EX1) probíhal podle normových požadavků normy ČSN EN 384 (73 1712) *Konstrukční dřevo – stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty* [9] a normy ČSN EN 408 (73 1741) *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností* [10]. Experiment probíhal na smrku ztepilém (*Picea abies* L.) i na borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Podle požadavků norem ČSN EN 384 (73 1712) [9] a ČSN EN 408 (73 1741) [10] byly stanoveny rozměry zkušebních těles na 25 × 25 × 475 mm s ohledem na nejmenší délku zkušebního tělesa podle ČSN EN 408 [10] rovné 19-ti násobku výšky průřezu. Každá dřevina se testovala při třech různých vlhkostech:

- 9 % – 12%,
- 30 %,

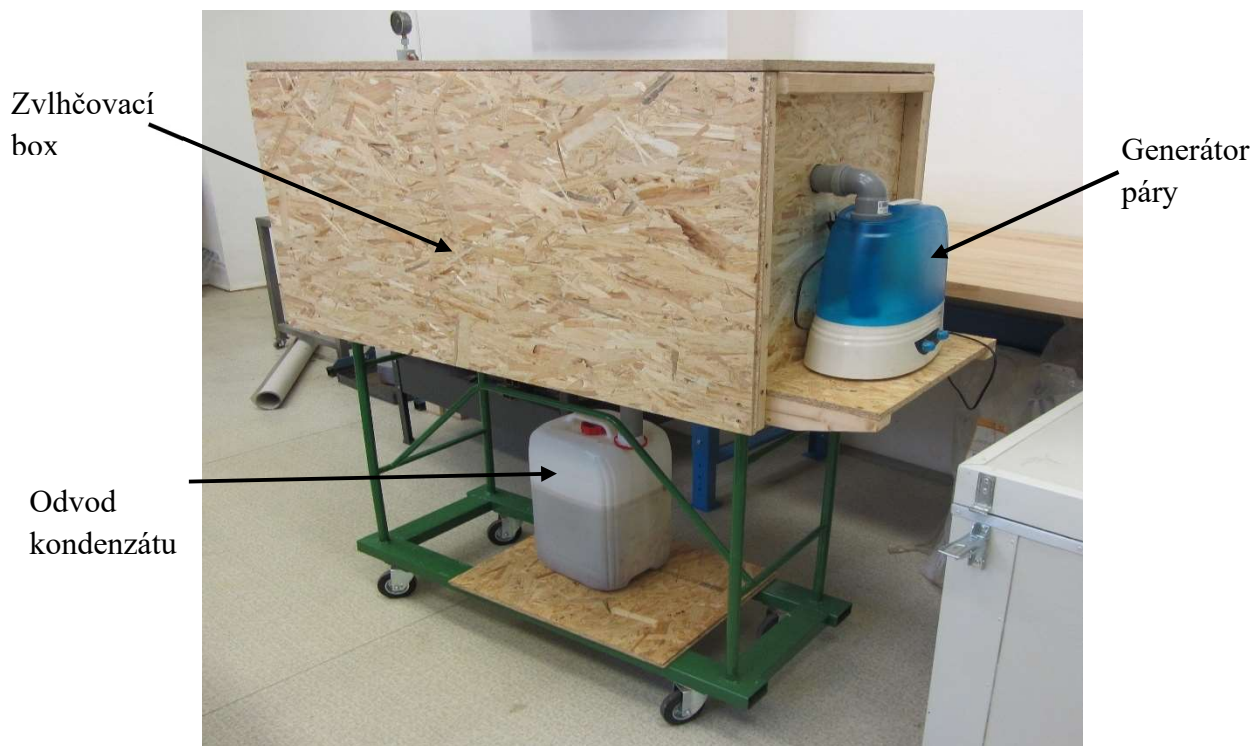
- 9 % – 12%, které bylo dosaženo vysušením pomocí EMW z vlhkosti 30 %.

Pro každou zkoumanou dřevinu byly vytvořeny tři zkušební série vzorků upravených na uvedené vlhkosti. Každá série obsahovala 50 kusů zkušebních těles. Celkem pro jeden typ dřeviny bylo připraveno 150 kusů zkušebních vzorků.

Před experimentálním měřením bylo vždy nutné všechny vzorky umístit do sušárny. Cílem umístění vzorků do sušárny a jejich vysušení proběhlo za účelem stanovení hmotnosti suchého vzoru  $m_0$ , určit relativní vlhkost. Vzorky byly do sušárny umístěny pomocí vyrovnaného roštu, který zajišťoval minimalizaci dotyku vzorků v ploše. Vzorky byly umístěny na rošty, které byly po vrstvách otočeny o 90°.

V průběhu měření byly vzorky v denním intervalu váženy na přesné analytické váze KERN KB 360 – 3N s váživostí do 360 g a s přesností vážení na 1 mg a přesností 0,5 mg.

Po ukončení vysoušení všech vzorků byly vzorky ze série 1 (50 kusů) umístěny do místnosti s teplotou  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a vlhkostí  $60\% \pm 5\%$ . V této místnosti docházelo k jejich stabilizaci na stanovenou hodnotu 9 % – 12 % relativní vlhkosti. Vzorky série 2 a série 3 (100 kusů) byly umístěny do zvlhčovacího boxu (Obr. 6). Zde byly vzorky vystaveny vlhkému prostředí, které bylo vytvářeno přehřátou párou. Vyšší teplota usnadňuje prostup vody do struktury dřeva, jak uvádí zdroj [19]. Během experimentu bylo zjištěno, že zvlhčování pomocí páry je rychlejší než když je vzorek potopen do vodní lázně. To je způsobeno velikostí molekul vodní páry a molekul vody.

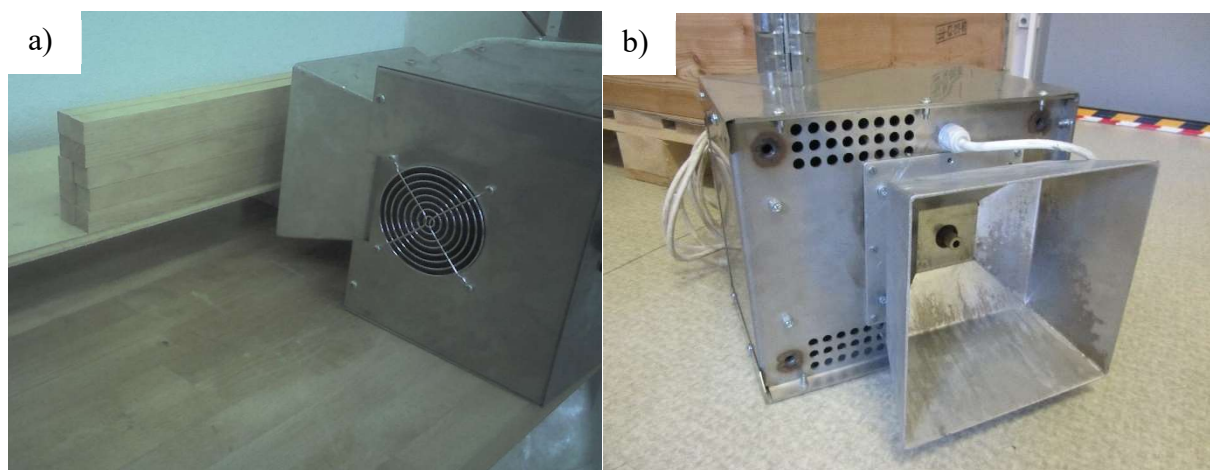


Obr. 6: Zvlhčovací box.

Zvlhčovací box, který je návrhem autora, je vytvořen z OSB desek tl. 22 mm. Vnitřní část boxu je vyložena PIR tepelnou izolací tl. 30 mm s nakaširovanou hliníkovou vrstvou. Spojení PIR desek a prostupy jsou opatřeny hliníkovou folií, která zajistí parotěsné spojení, a tak nebude vlhkost vstupovat do izolace a konstrukce boxu. Tepelná izolace chrání desky OSB boxu před vysokou vlhkostí, která byla v průběhu měření uvnitř boxu.

Vlhkost byla vytvářena generátorem mlhy, který byl umístěn z venkovní strany zvlhčovacího boxu. Po dosažení stanovené vlhkosti bylo zvlhčování zastaveno a série 2 byla mechanicky zkoušena.

Vzorky série 3 byly následně vysoušeny EMW zářením, průběh je zdokumentován na (Obr. 7 a). Pro vysoušení byl použit mikrovlnný generátor Romill (Obr. 7 b). Přístroj je napájen 230 V s frekvencí 50 Hz. Výkon generátoru je 1500 W. Při mikrovlnné frekvenci 2,45 GHz je maximální výkon 1000 W, který nelze regulovat.



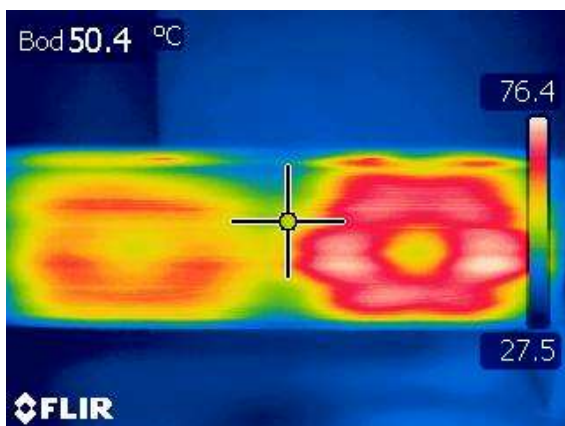
Obr. 7: a) Z průběhu vysoušení pro sérii 3, b) Generátor Romill – čelní pohled.

S ohledem na délku vzorků byl průběh vysoušení rozdělen na pravou a levou část, takto byla totiž pokryta celá délka vzorku. Na jeden vysoušecí cyklus bylo použito najednou 10 vzorků, které se poskládaly do 5 řad a 2 sloupců, jak je vidět na (Obr. 7 a).

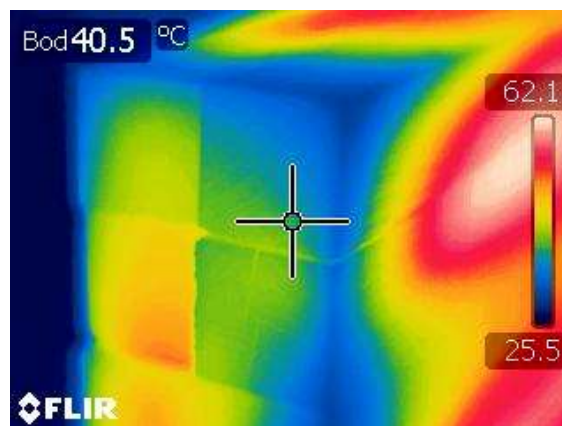
Vysoušení probíhalo v cyklech, kde 5 minut byl vzorek ozařován z levé části, následně 5 minut z pravé části, toto je velice dobře patrné z termogramu zobrazeného na (Obr. 8), kde je levá část obrázku viditelně chladnější než pravá část. Toto bylo způsobeno postupným ozařováním. Po vysoušení byly vzorky rozmístěny na rošt a 10 minut byly ponechány v místnosti s teplotou  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a vlhkostí  $60\% \pm 5\%$ , kde docházelo k postupnému odparu vody. Po každém vysoušecím cyklu byla kontrolována teplota pomocí termokamery Flir B425.

Příklad termogramů z průběhu vysoušecího cyklu je zobrazen na (Obr. 9), kde je velice dobře vidět, že i teplota na druhé straně vzorku dosahuje přibližně  $50\text{ °C}$ . Následně proběhl tento cyklus ještě jednou a stabilizace probíhala až do dalšího ozařování následující den, před

kterým byl vzorek opět zvážen. Toto vysoušení proběhlo celkem 4 krát, aby byla dosažena stanovená vlhkost 9 % – 12 %.



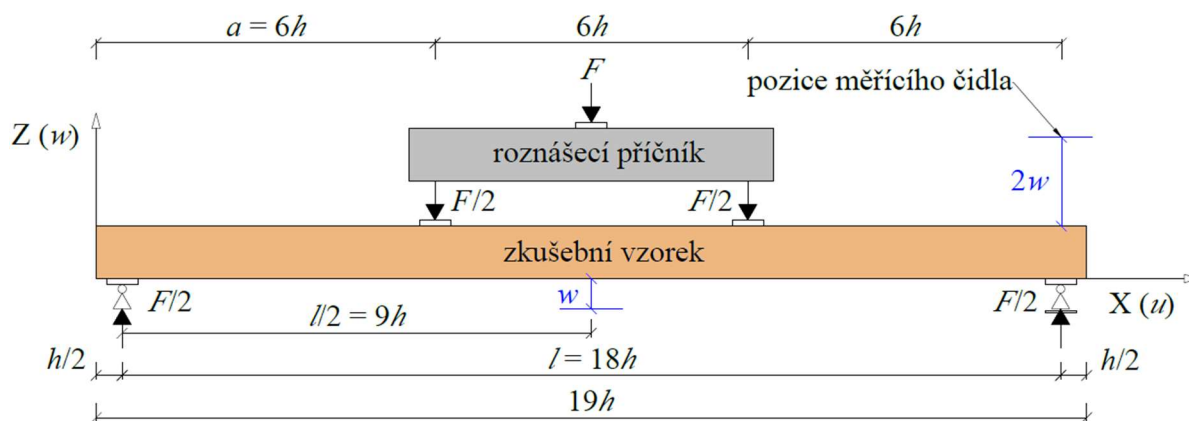
Obr. 8: Rozložení teplotního pole po druhé části vysoušení.



Obr. 9: Detailní rozložení teplotního pole.

### D.1.1 Mechanické testování

Vzorky, které byly připraveny k mechanickému testování, se před transportem obalily LDPE samosmršťující folií. Tímto postupem byl eliminován vliv okolní vlhkosti, které by mohlo zkreslit výsledky mechanických zkoušek. Zkoušky byly provedeny v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně na přesném mechanickém lisu FPZ 100/1 umožňující zatěžování přírůstkem deformace. Ve zkušebně byla udržována po dobu měření laboratorní teplota  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a vlhkost  $60\% \pm 5\%$ . Každý vzorek byl těsně před umístěním do zkušebního lisu vybalen z folie. Při experimentálním testování byla zkušební tělesa prostě podepřena. Vzdálenost podpor o velikost 18-ti násobku výšky průřezu, tj. 450 mm, byla zvolena dle ČSN EN 408 [10]. Zatěžovací schéma pro zkušební tělesa na čtyřbodový ohyb je zobrazené na (Obr. 10). Zatížení bylo provedeno symetricky dvěma břemeny vzájemně od sebe a od podpor vzdálenými o 6-ti násobek výšky průřezu což odpovídá 150 mm, toto zatížení bylo do vzorků přenášeno přes roznášecí příčník, který je vidět na (Obr. 10).

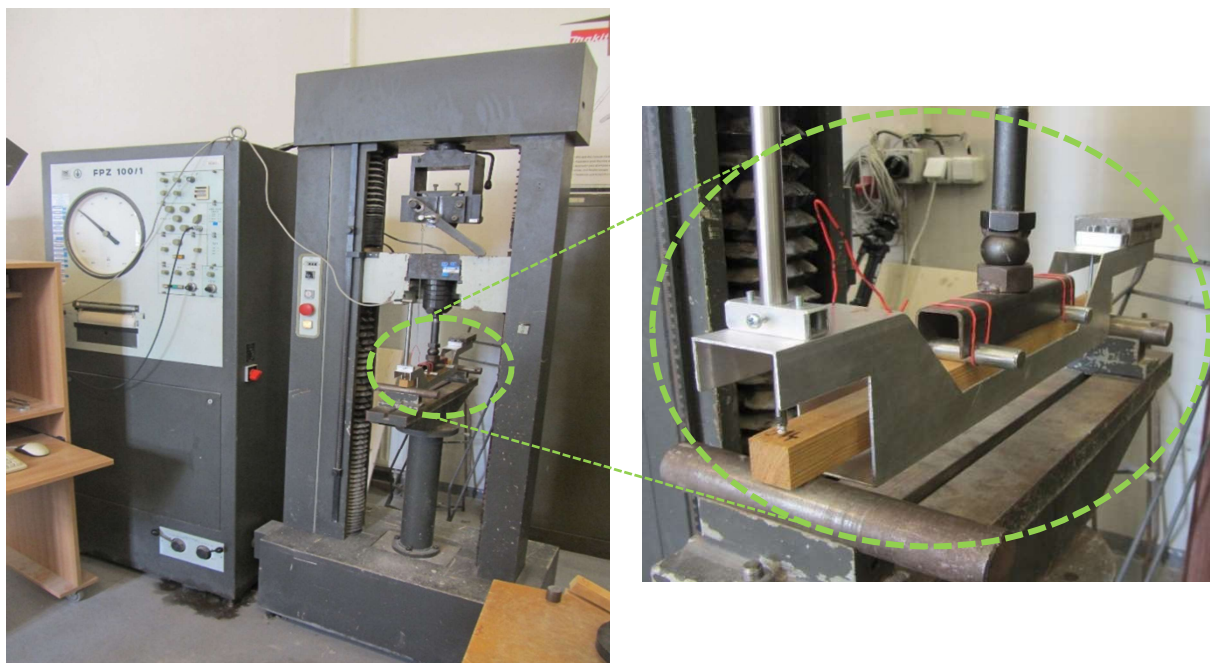


Obr. 10: Zatěžovací schéma pro čtyřbodový ohyb.

Zkušební sestava byla doplněna o vyvinutý hliníkový přípravek. Přípravek eliminoval vybočení zkušebních těles při umožnění jejich deformace v rovině působení zatížení. Přípravek byl na horním povrchu osazen indukčností snímačem dráhy HBM WA-T/50 mm [33] s měřícím rozsahem 0 až 50 mm s přesností měření 0,001 mm. Snímač zaznamenával svislý posun  $w$  a byl umístěn v pozici podle (Obr. 10). K symetrickému roznosu zatěžovací síly byl použit ocelový roznášecí příčník. Velikost působícího zatížení byla zaznamenávána kalibrovaným odporovým siloměrem, který je součástí lisu FPZ 100/1. Snímač byl připojen k osmikanálové měřicí ústředně HBM Spider 8 [33], která byla spojena s počítačem. Celá zkušební soustava v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, FAST VUT je zobrazena na (Obr. 11). Vizualizace průběhu zatěžování byla on-line zobrazována při zkoušení pomocí programu Catman Easy [6]. Data byla zaznamenávána s ohledem na typ a charakter statické zatěžovací zkoušky s frekvencí záznamu 5 Hz, tj. po časovém intervalu 0,2 s. Naměřená data byla po zkouškách upravena pomocí uživatelského makra vytvořeného v programovacím jazyce Visual Basic.

Ze statisticky vyhodnocených naměřených dat byl stanoven lokální MOE a MOR. Tyto elastické a materiálové konstanty jsou uvedeny v (Tab. 3).

## D.1.1.1 Stanovení lokálního modulu pružnosti v ohybu (MOE)



Obr. 11: Zkušební lis FPZ 100/1 při zatěžovací zkoušce na čtyřbodový ohyb.

Lokální MOE se stanovil za použití regresní analýzy vycházející ze záznamu zatěžovací dráhy. Pro regresní analýzu je podle [10] nutné stanovit odhadnuté největší zatížení  $F_{max,est}$ .  $Z F_{max,est}$  se následně stanoví  $0,1 \cdot F_{max,est}$  a  $0,4 \cdot F_{max,est}$ . Tento interval úrovně zatížení je použit dále pro regresní analýzu. Určí se nejdelší úsek části, jehož součinitel korelace je 0,99 nebo lepší. Za předpokladu, že je tento úsek nejméně v rozmezí  $0,2 \cdot F_{max,est}$  až  $0,3 \cdot F_{max,est}$  lze stanovit MOE pomocí vztahu (2) podle [10], kde je  $F_2 - F_1$  přírůstek zatížení v [N] na regresní přímce se součinem korelace 0,99 nebo lepším a  $w_2 - w_1$  je přírůstek deformace v milimetrech odpovídající rozdílu  $F_2 - F_1$ .

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (2)$$

V případě, že v rozmezí  $0,2 \cdot F_{max,est}$  až  $0,3 \cdot F_{max,est}$  nelze dosáhnout korelace 0,99 nebo lepší je zkušební vzorek vyloučen. Všechny zkoušené vzorky splnily požadavky tohoto kritéria a nebylo nutné tedy žádný vzorek vyloučit.

## D.1.1.2 Pevnost v ohybu MOR

Pevnost v ohybu MOR lze stanovit ze vztahu (3) [10], který byl převzat z ČSN EN 408 (73 1741) [10] nebo lze použít vztah (4).

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}, \quad (3)$$

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W}, \quad (4)$$

kde  $a$  je vzdálenost zatěžovacího břemene od bližší podpory v [mm]  $F_{\max}$  je maximální síla, která byla zaznamenána před porušením v [kN] a  $W$  je průřezový modul v [mm<sup>3</sup>].

#### D.1.1.3 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $f_{c,0}$

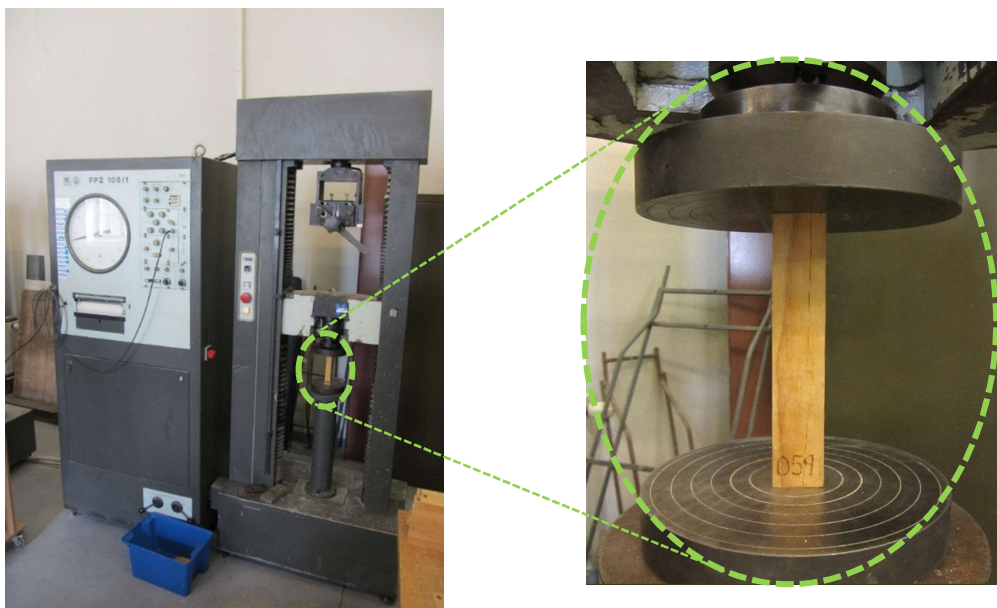
Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny  $f_{c,0}$  probíhalo dle ČSN EN 408 (73 1741) [10]. Zkušební těleso musí mít plný průřez a délku odpovídající 6-ti násobku menšího průřezového modulu. Vzhledem k tomu byly zvoleny rozměry zkušebních vzorků s plným čtvercovým průřezem o straně 25 mm s výškou 150 mm. Čelní plochy byly pečlivě upraveny, aby byly rovinné a vzájemně rovnoběžné a kolmé k ose tělesa.

Při realizaci zkoušky je podle požadavku ČSN EN 408 (73 1741) [10] důležité, aby doba dosažení  $F_{\max}$  tedy maximální síly bylo dosaženo v průběhu 300 s ± 120 s.

Pevnost v tlaku  $f_{c,0}$  je stanovena ze vztahu (5) [10], kde  $F_{\max}$  je maximální dosažená síla v [N] a  $A$  je plocha průřezu vzorku v [mm<sup>2</sup>].

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (5)$$

Na (Obr. 12) je zobrazena zatěžovací soustava při zkoušce tlaku rovnoběžně s vlákny.



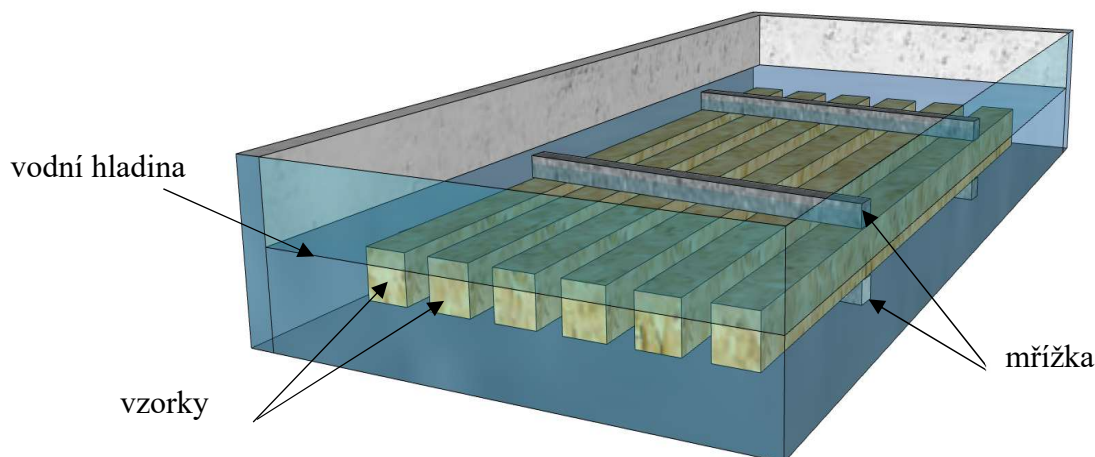
Obr. 12: Zkušební lis FPZ 100/1 při zatěžovací zkoušce tlaku rovnoběžně s vlákny.

## D.2 Experiment 2 (EX2) – Experiment vysokého navlhání a následného vysoušení pomocí EMW

Cílem experimentální části vysoušení vzorků s vysokou vlhkostí bylo stanovit vhodný čas, který by nejefektivněji vysušoval vzorky Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) bez viditelného poškození výsušnými trhlinami.

Vzorky se umístily do sušárny Memmert UN 30, kde byla nastavena teplota na +103 °C. Hmotnost vzorků byla zjišťována pomocí laboratorní analytické váhy KERN AS 220.R2. Vážení probíhalo v jednodenním intervalu. Na základě zpracované metodiky přemísťování vzorků v průběhu vysoušecího cyklu docházelo k pravidelnému přemísťování vzorků na různé pozice v sušárně, aby byla vyloučena systematická chyba při sušení. Když se rozdílná hmotnost blížila stanovenému limitu 0,02 g dle [7] a [8], tak kontrolní vážení probíhalo po dvou hodinách, jak udává [7], [8] i [19]. Po splnění podmínky [8] byly vzorky vyňaty ze sušárny a byla zaznamenána jejich suchá hmotnost  $m_s$ .

Po vysoušení vzorků pokračoval experiment zvlhčováním vzorků na hodnotu maximálně 95 % vlhkosti dřeva. Hranice 95 % byla zvolena z důvodů, že nad touto hranicí je podle [24] již gravimetrická metoda ovlivněna vysokou chybou. Zvlhčování probíhalo ve vodní lázni, tak jak je schematicky znázorněno na (Obr. 13). Vzorky byly umístěny na mřížku, aby nebyly v kontaktu s nádobou. Mřížka zajišťovala, aby byly vzorky ze všech stran rovnoměrně smáčeny vodou. Na mřížce byly vzorky umístěny do jedné vrstvy s dostatečnými mezerami mezi sebou. Zabránění vyplavání vzorků z nádoby bylo zajištěno další mřížkou, která byla umístěna nad vzorky, a která byla zatížena. Po celé instalaci byl prostor vzorků zaplaven vodou nad úroveň horní hranice mřížky. Vzorky byly cyklicky kontrolovány každý den, kdy došlo k vyjmutí všech vzorků z nádoby za účelem stanovení jejich hmotnosti. Před samotným zvážením byly vzorky osušeny od povrchové vody. Po zvážení všech vzorků byla opět připravena mřížka, na kterou se vzorky umístili. Při vracení vzorků byla použita metodika na přemísťování vzorků. V době, kdy vzorky dosáhly relativní vlhkosti 95 %, byl proces zvlhčování ukončen.



Obr. 13: Zvlhčovací nádoba.

Poslední fáze experimentu spočívala ve vysušení vzorků pomocí mikrovlnného záření EMW. Před zkouškou bylo zvoleno, že se experimentální měření ukončí, když bude relativní vlhkost vzorku 5 %. V této fázi se testovaly doby cyklu ozařování a potřebná doba na vysoušení na stanovenou mez. Snahou bylo nalézt ideální délku vysoušecího cyklu, aby nedocházelo k výrazným výsušným trhlinám. Pro sledování byly zvoleny vysoušecí cykly 3, 6, 9, 12 a 15 min. V průběhu jednoho ozařovacího cyklu byly vzorky vystaveny EMW po zvolenou dobu. Následně byly vzorky přemístěny na rošt, kde probíhala relaxace vzorků. V tomto čase se ze vzorků uvolňovala vodní pára. Další ozařovací cyklus proběhl za 24 hodin.

### D.3 Modelování struktury dřeva pomocí programu ABAQUS

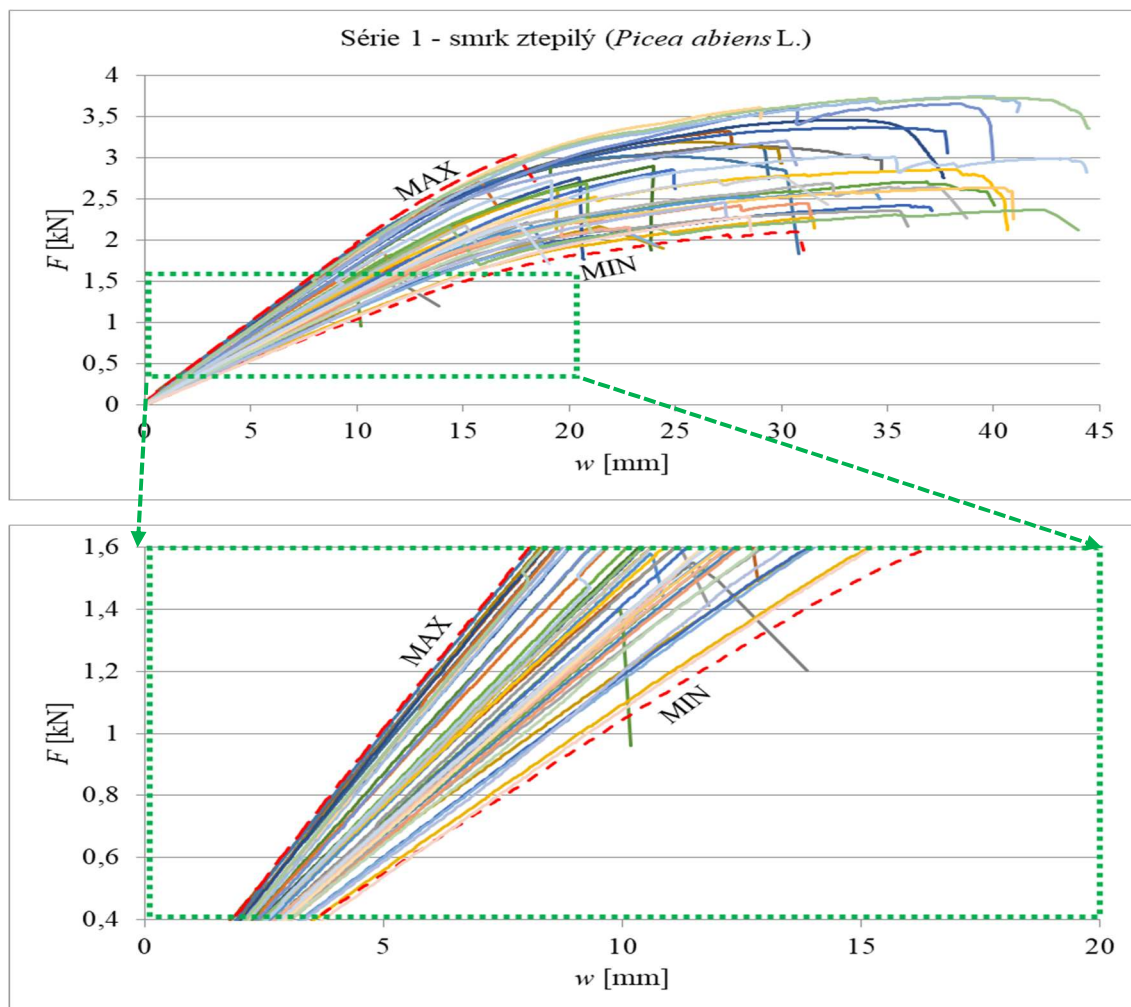
Pro numerické modelování byl použit systém ABAQUS [1]. V tomto systému pro modelování chování a popisu dřeva chybí materiálový modul, který by popisoval přesné chování dřeva. Jelikož se jedná o otevřený systém, tak je možné si vytvořit vlastní materiálový model [26], který bude chování dřeva popisovat.

ABAQUS umožňuje uživatelsky do výpočtu zahrnout předem nadefinované materiálové modely a podprogramy. Pro doplnění materiálových modelů dřeva se nejvíce osvědčily podprogramy DFLUX a UMAT [26]. Podprogram DFLUX definuje tok vlhkosti na povrchu dřeva. Podprogram UMAT umožňuje implementaci reologického modelu dřeva.

## E VÝSLEDKY A DISKUZE

### E.1 Výsledky a vyhodnocení experimentu EX1

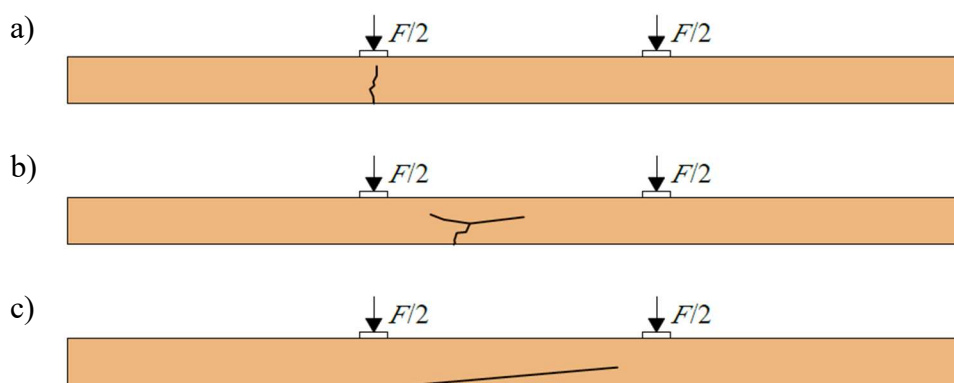
Na (Obr. 14) je uveden zatěžovací diagram pro sérii 1 pro smrk ztepilý. Ostatní zatěžovací diagramy jsou uvedeny v disertační práci. V zatěžovacím diagramu je zobrazena část, která vstupovala do vyhodnocení s ohledem na [10], které je popsáno v kapitole D.1.1.1



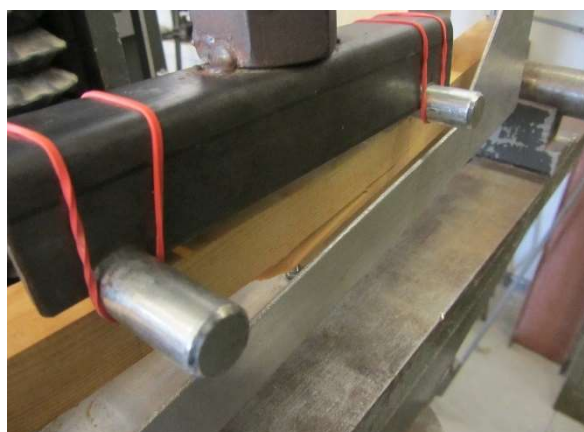
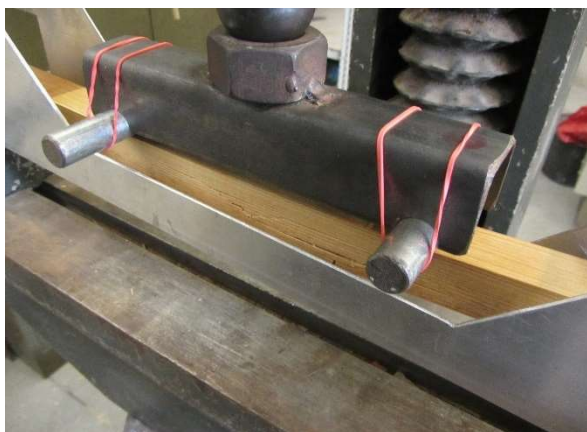
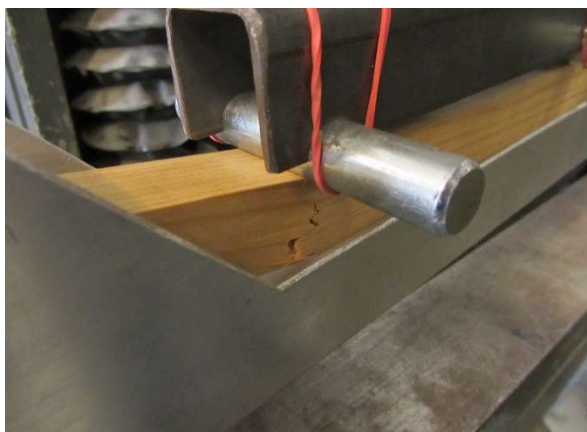
Obr. 14: Série 1 smrk ztepilý (*Picea abies* L.).

#### E.1.1 Druhy porušení při čtyřbodovém ohybu

Testy se prováděly až do porušení vzorku. Nejčastější typy a způsoby porušení pod působícími břemeny jsou zobrazené na (Obr. 15). Poškození (Obr. 15 a)) je v místě pod působícím břemenem. Poškození (Obr. 15 b)) a (Obr. 15 c)) je mezi břemeny v místě nejvyššího momentu, kdy u (Obr. 15 c)) je trhлина vytvořená rovnoběžně s vlákny. Tyto druhy poškození odpovídají např. [33]. Skutečné poškození z experimentu je zobrazeno na (Obr. 16).



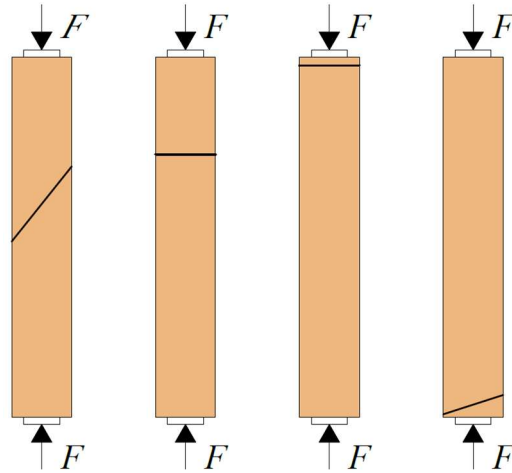
Obr. 15: Modely poškození při čtyřbodovém ohybu.



Obr. 16: Druhy poškození při testování pomocí čtyřbodového ohybu.

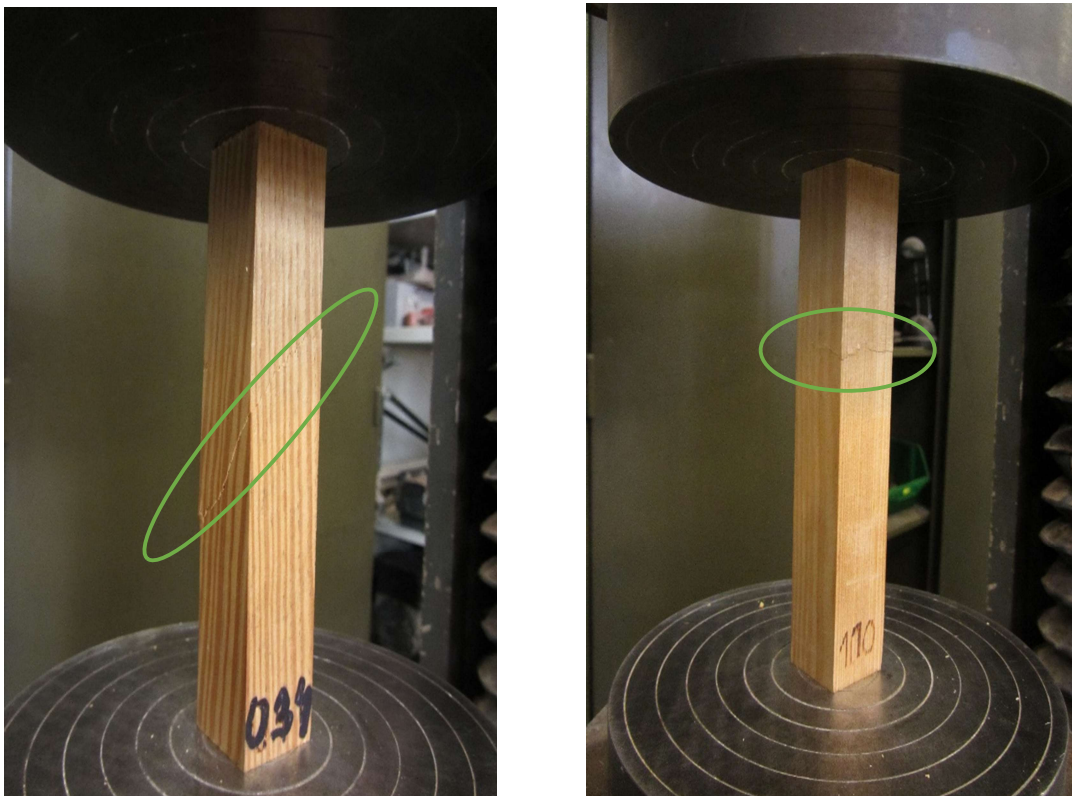
### E.1.2 Druhy porušení při tlakových zkouškách

Při testování tlaku rovnoběžně s vlákny docházelo nejčastěji k poškození které odpovídá (Obr. 17), který vychází ze [5] a [33].



Obr. 17: Modely poškození při tlaku.

Nejčastěji došlo k poškození ve střední části vzorku, jak je vidět na (Obr. 18). Další poškození byla zaznamenána ve spodní nebo horní části vzorku. Poškození je označeno zelenou elipsou pro snadnější orientaci.



Obr. 18: Poškození ve střední části vzorku.

## E.1.3 Výsledné hodnoty získané z experimentu EX1

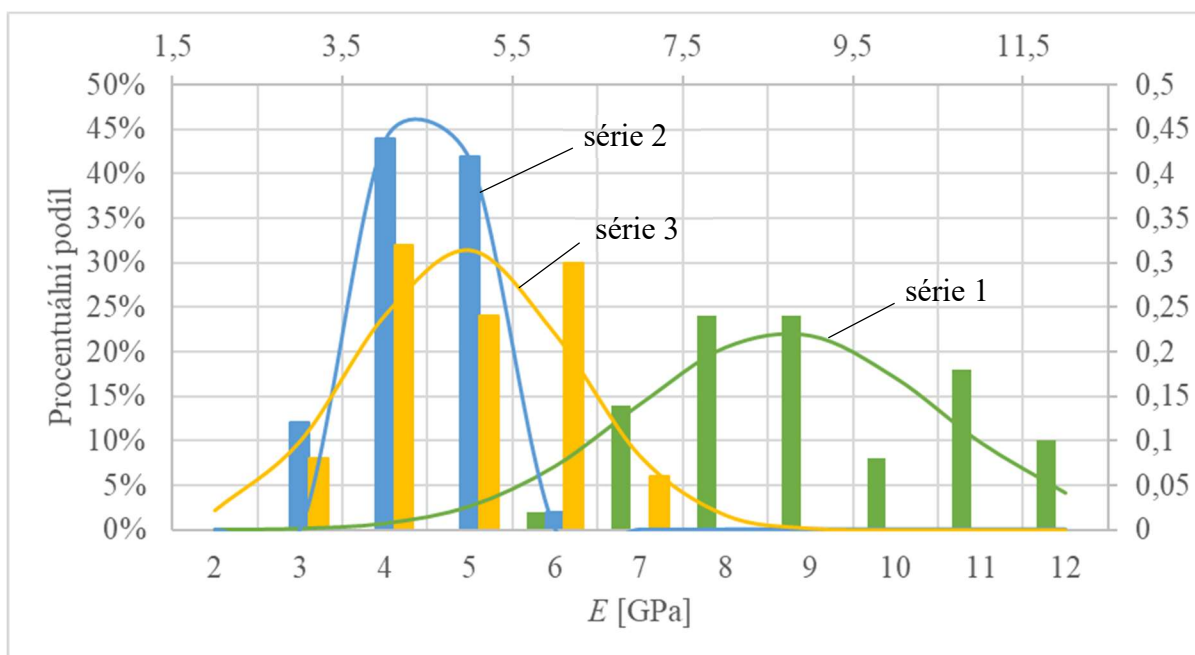
V (Tab. 3) jsou přehledně zapsány všechny naměřené a vypočítané hodnoty, které byly stanoveny z mechanických zkoušek.

Tab. 3: Výsledné hodnoty mechanických zkoušek.

	A	B	C	D	E	F
	smrk ztepilý ( <i>Picea abies</i> L.)			borovice lesní ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)		
	Série 1	Série 2	Série 3	Série 1	Série 2	Série 3
Vlhkost vzorku [%]	9,04	28,89	11,24	10,78	22,93	12,01
$F_{\max,est}$ [kN]	4	1	1,6	3,3	4	3
0,1 $F_{\max,est}$ [kN]	0,4	0,1	0,16	0,33	0,4	0,3
0,4 $F_{\max,est}$ [kN]	1,6	0,4	0,64	1,32	1,6	1,2
Hodnota spol. $R_{\emptyset}$ [-]	0,999608	0,999209	0,999871	0,999818	0,998906	0,997033
Hodnota spol. $R_{\min}$ [-]	0,995453	0,995537	0,998471	0,998972	0,990069	0,994868
Hodnota spol. $R_{\max}$ [-]	0,999992	0,999976	0,999995	0,999996	0,999974	0,999997
$E_{m,\emptyset}$ [GPa]	8,649	3,974	4,448	7,660	8,649	7,657
$E_{m,\min}$ [GPa]	5,430	2,260	2,715	4,969	5,430	2,143
$E_{m,\max}$ [GPa]	11,235	5,017	6,506	10,413	11,235	10,441
$E_{m,5\%}$ [GPa]	6,242	4,396	3,338	6,859	6,242	6,781
$E_{m,95\%}$ [GPa]	12,167	5,590	7,513	10,220	12,167	10,319
$f_{m,\emptyset}$ [MPa]	75,434	22,755	32,524	72,042	51,148	63,151
$f_{m,\min}$ [MPa]	40,262	16,945	16,389	44,010	29,725	24,208
$f_{m,\max}$ [MPa]	108,040	29,367	47,456	94,832	70,520	82,942
$f_{m,5\%}$ [MPa]	45,39	14,15	17,04	54,06	37,20	47,65
$f_{m,95\%}$ [MPa]	104,82	30,48	45,62	90,33	64,34	80,97
$F_{\max,c\emptyset}$ [kN]	27,41	14,73	29,79	26,77	18,71	26,84
$f_{c,0,\emptyset}$ [MPa]	43,856	23,564	47,659	33,017	22,604	34,180
$f_{c,0,\min}$ [MPa]	30,800	15,344	28,800	29,600	16,600	35,200
$f_{c,0,\max}$ [MPa]	54,400	31,840	64,800	54,400	38,000	51,200
$f_{c,0,5\%}$ [MPa]	33,946	17,766	27,303	37,719	20,596	32,871
$f_{c,0,95\%}$ [MPa]	55,104	29,868	61,746	48,193	40,612	51,448

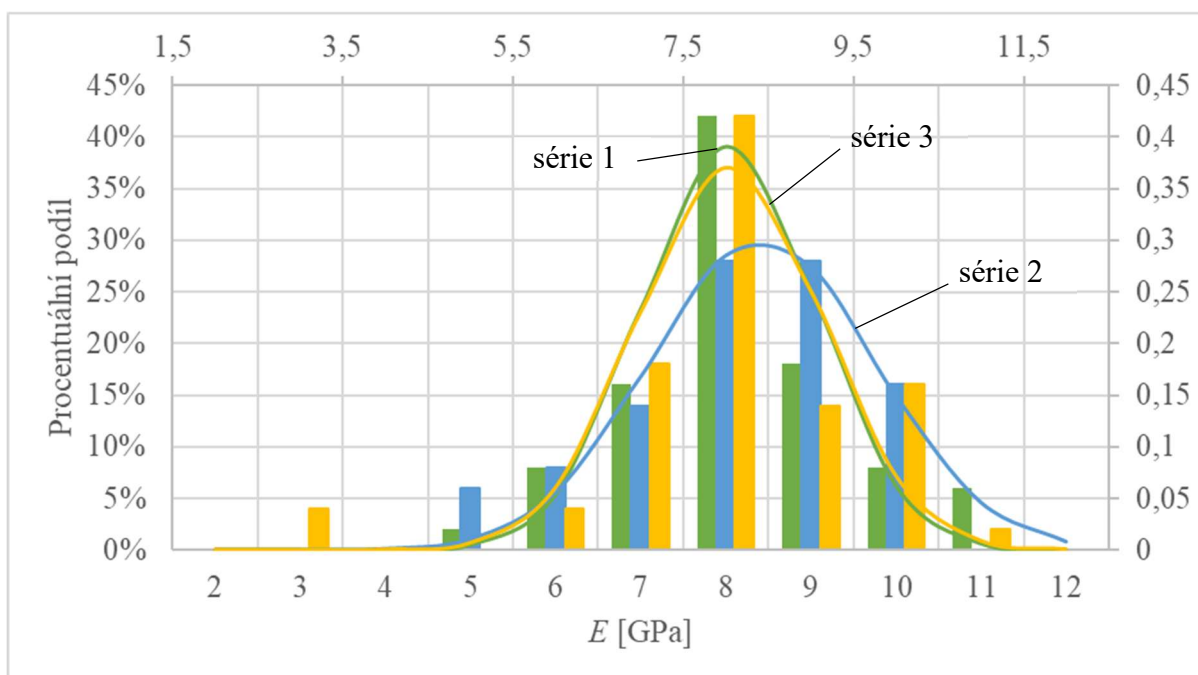
E.1.4 Porovnání lokálního ohybového modulu  $E$  pro všechny série

Výsledné hodnoty lokálního MOE všech tří sérií pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) jsou zobrazeny na (Obr. 19), kde je zelenou barvou znázorněná série 1, modrou barvou série 2 a žlutou barvou série 3. Vypočítané hodnoty jsou zobrazeny v histogramu, který barevně odpovídá zvolené sérii. Křivkami normálního rozdělení jsou zobrazeny statistické hodnoty, které odpovídají naměřeným hodnotám, stanoveným pro jednotlivé histogramy. Z obrázku (Obr. 19) je patrné, že při zvýšení vlhkosti z 12 % na 30 % relativní vlhkosti dřeva se MOE sníží z 9 GPa na 4 GPa. V případě vysušení dřeva pomocí EMW na 12 % relativní vlhkosti dřeva se MOE zvýší na 5 GPa, ale nedostane se až na původních 9 GPa, které bylo naměřeno se vzorky série 1. Z výsledků měření lze konstatovat, že následkem EMW vysoušení došlo ke snížení MOE vzorků mezi sérií prvků 1 a sérií prvků 2 o 44,5 %.



Obr. 19: Výsledky zatěžovacích zkoušek – lokální MOE s vyznačením normálních rozdělení pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.).

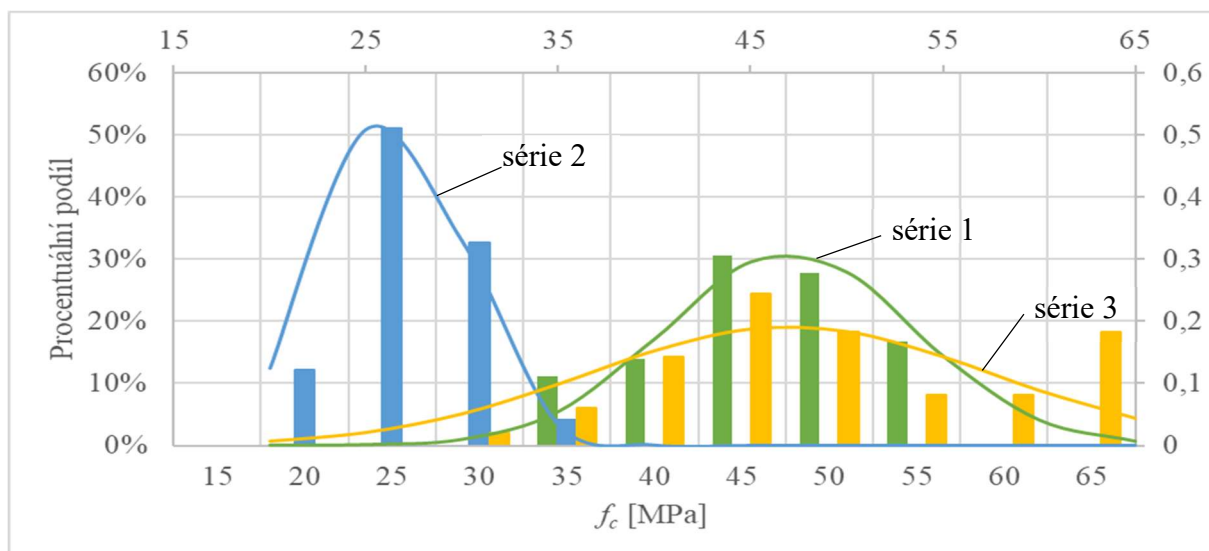
Na (Obr. 20) jsou zobrazeny všechny tři série, které byly naměřeny pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.). Ze zobrazení výsledných hodnot lokálního MOE je velice patrné, že borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) není tak náchylná na změnu vlhkosti jako je tomu u smrku ztepilého (*Picea abies* L.). Z výsledků je vidět, že rozdíl mezi sérií 1 a sérií 3 je minimální. I když série 1 má vlhkost 12 % a série 3, má také vlhkost 12 %, ale bylo jí dosaženo pomocí EMW vysoušení z vlhkosti 30 %. Hodnoty obou sérií jsou prakticky totožné. V případě série 2, kdy se testovaly vzorky s vlhkostí 30 % je vidět, že výsledky jsou rozprostřeny do více sloupců histogramu, ale střední hodnota MOE histogramu se pohybuje na stejné hodnotě jako u série 1 a série 3 tedy kolem 8 GPa.



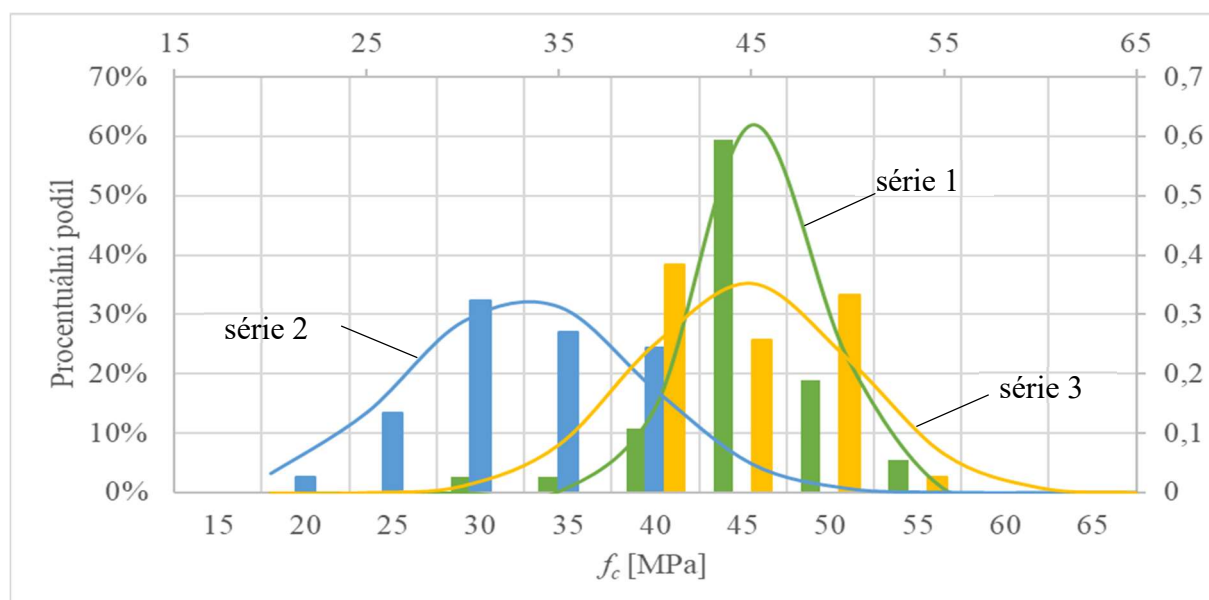
Obr. 20: Výsledky zatěžovacích zkoušek – lokální MOE s vyznačením normálních rozdělání pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

E.1.5 Výsledky tlaku rovnoběžně s vlákny  $f_{c,0}$  pro všechny série

Na (Obr. 21) jsou zobrazeny výsledky tlakových zkoušek pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.). Výsledné hodnoty pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) jsou zobrazeny na (Obr. 22). Pro obě dřeviny platí, že výsledná hodnota tlaku pro sérii 3 je vyšší než hodnota tlaku pro sérii 1.



Obr. 21: Výsledky zatěžovacích zkoušek – tlak rovnoběžně s vlákny s vyznačením normálních rozdělání pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.).



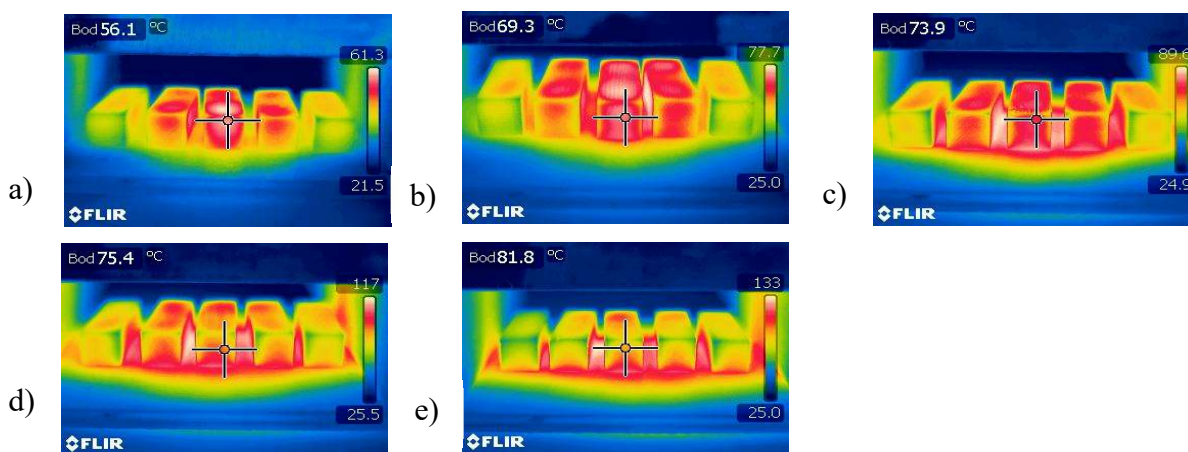
Obr. 22: Výsledky zatěžovacích zkoušek – tlak rovnoběžně s vlákny s vyznačením normálních rozdělání pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Z výsledků je vidět, že smrk je více náchylný na zvýšení vlhkosti než borovice. V sérii 2 klesla hodnota tlaku rovnoběžně s vlákny na přibližně polovinu, u borovice tato hodnota klesla přibližně o jednu třetinu.

## E.2 Výsledky a vyhodnocení experimentu EX2

Ke stabilizaci všech vzorků na hodnotu zcela vysušeného vzorku došlo po 13 dnech. Po stabilizační fázi pokračovala zvlhčovací fáze experimentu, která probíhala 35 dní. Postupně byly zapisovány hodnoty vlhkého vzorku  $m_v$  a byla z nich počítána vlhkost, aby bylo zřejmé, kdy může být experiment ukončen. V první části zvlhčování do 11. dne vlhkost stoupala více strměji. Tento 11. den měly vzorky absolutní vlhkost od 55 % do hodnoty 87. Za tímto bodem došlo k útlumu sorpce vlhkosti.

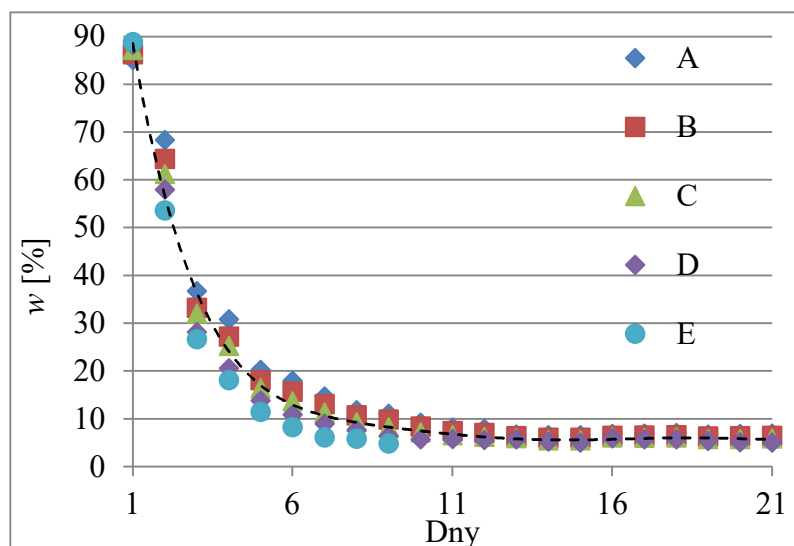
Následně byly vzorky po jednotlivých skupinách vkládány pod generátor mikrovlnného záření a byly vystaveny EMW po dobu, která jim byla určena. Po tomto cyklu byly vzorky umístěny do místnosti s teplotou  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a s relativní vlhkostí  $60\% \pm 5\%$ . V této místnosti probíhala relaxace vzorků po dobu 24 hodin. Na (Obr. 23) jsou vidět termogramy pro jednotlivé skupiny po EMW. V pravé části obrázku je vidět stupnice s minimální a maximální změřenou teplotou. V levé horní části snímku je teplota vztažená k záměrnému kříži, který byl měřen na prostředním vzorku.



Obr. 23: Termogramy pro experiment EX2, pro jednotlivé časové intervaly vysoušení: a) 3 min, b) 6 min, c) 9 min, d) 12 min a e) 15 min.

V (Obr. 24) jsou znázorněny výsledné hodnoty vlhkosti jednotlivých skupin. Pro skupinu byl experiment ukončen, když dosáhl hodnoty 5 % relativní vlhkosti. Této hodnoty dostáhla skupina E, která byla vysušena 15 minut za 8 cyklů a skupina D, která byla ozařována 12 minut až po 20 cyklech. Další skupiny A, B a C se k této hodnotě nedostali. Měření bylo

ukončeno po 20 cyklech, kdy skupiny A, B a C již neztrácely další vlhkost. Skupiny A – E jsou na (Obr. 24) znázorněny barevnými body. Dále je v (Obr. 24) vyznačena střední hodnota vlhkosti všech skupin, která je naznačena černou čárkovanou křivkou a zobrazuje trend vysychání za pomoci EMW.

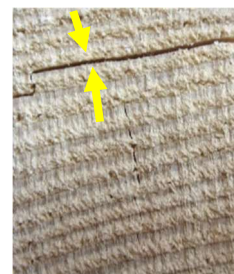


Obr. 24: Průměrná vlhkost skupin vzorků v průběhu vysoušení. Skupina E dosáhla 9. den hodnoty 5 % a byl pro tuto skupinu ukončen experiment.

V experimentu byly pozorovány makroskopické změny na povrchu jednotlivých vzorků, které byly převážně orientovány ve směru kolmém na vlákna. Všechny skupiny vzorků A-E obsahovaly viditelné výsušné trhliny kolmo na vlákna. Toto poškození je vidět na (Obr. 25). Dále byla objevena i trhlina ve směru rovnoběžném s vlákny, ta je vidět na (Obr. 26).



Obr. 25: Poškození v kolmém směru na vlákna.



Obr. 26: Poškození rovnoběžné se směrem vláken.

Byla vypracována metodika pro přemísťování vzorků, která se při experimentu osvědčila. Docházelo k systematickému měnění pořadí pozic zkušebních vzorků s důrazem na to, aby nebyl nikdy stejný na stejném místě, tím byla vyloučena chybovost. Toto řešení bylo zvláště důležité při ozařování mikrovlnnými vlnami, kde bylo důležité měnit pořadí, z důvodů neměnné polohy vysílací antény. V tomto případě se jednalo o centrickou anténu, kde byla největší intenzita ve středu. Výsledkem experimentu je tvrzení, že v případě, kdy je potřeba snížit relativní vlhkost dřevěného vzorku pod hodnotu 5 %, je potřeba vzorek ozařovat v cyklech minimálně 12 minut. Počet cyklů je závislý na velikosti a původní vlhkosti vzorku. Během měření nedošlo k průkaznému poškození vzorků, které byly podrobeny delšímu cyklu vysoušení oproti vzorkům, které byly vysoušeny kratší čas.

## F ZÁVĚR

V průběhu zpracování disertační práce byly postupně plněny dílčí kroky, které umožnily splnění všech cílů disertační práce.

První cíl práce – rozvinutí popisu hygrotermálního chování dřeva bylo např. dosaženo díky zjištěným poznatkům při zadávání přesnosti vlhkosti do výpočtu, která značně ovlivní výsledné hodnoty.

Druhý cíl disertační práce – numerické a experimentální testování vybraných vlastností dřeva při výšné vlhkosti. Experimentálního testování pro dřevěné vzorky s vlhkostí 10 % byly potvrzeny běžně používané hodnoty v odborné a vědecké literatuře. V případě zvlhčených vzorků nad vlhkost *BNV* byly nalezeny velké rozdíly experimentálně zjištěných hodnot a hodnot z odborné literatury pro smrkové a borové dřevo. Zjištěný rozdíl mezi hodnotami mohl být způsobený tím, že byly všechny vzorky umístěny do sušárny, a tím došlo hlavně u borového dřeva k odstranění většiny pryskyřičných složek ze dřeva. Tím tedy u borovice vzniklo větší množství prázdných kapilár, které výsledky mohly ovlivnit. Výsledné hodnoty vybraných mechanických a elastických vlastností pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) a borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) jsou uvedené v (Tab. 3).

Třetí cíl – studium vlivu EMW na vysoušení vzorků s vysokou vlhkostí a maximalizování eliminace výsušných trhlin. Pro tento cíl byl provedeny dva experimenty. První část byla provedena v experimentu EX1, kde bylo mimo jiné zkoumáno jaký vliv má EMW na pevnost dřeva. Vzorky byly navlhčeny nad *BNV* a následně pomocí EMW vysoušeny na vlhkost 10 %. Za předpokladu použití stejně výkonného generátoru se stejným rozložením mikrovlnného pole, které ovlivňuje tvar antény a stejné velikosti vysoušených vzorků lze stanovit, že při vysoušecích cyklech trvajících 5 minut + relaxace 10 minut a 8 opakováních

během 4 dnů. Nedojde k výraznému snížení mechanických vlastností, jak je uvedeno v (Tab. 3). Druhá část byla provedena na experimentu EX2. Při tomto experimentu bylo mimo jiné zkoumáno jak EMW poškodí vzorky, které jsou významně navlhčeny. Experiment EX2 dokázal, že navlhčené vzorky až na 95 % relativní vlhkosti je možné vysušit pomocí EMW bez výrazných výsušných trhlin a to v efektivním čase. Při použití stejného EMW popsaného výše lze stanovit, že při vysoušecích cyklech trvajících minimálně 12 minut + relaxaci 24 hodin a 20 opakováních lze vzorky vysušit až na hodnotu 5 % vlhkosti. Při ozařování 15 minut + relaxace 24 hodin lze hodnotu 5 % relativní vlhkosti dosáhnout již za 8 opakování. Doba relaxace může být zkrácena a to na minimálně čas odpovídající ozařování. Vzorky nevykazovaly významnější výsušné trhliny, které by významně poškodily strukturu dřeva a tudíž nedochází ani k snížení pevnosti dřeva což bylo ověřeno experimentem EX1.

Ke splnění cílů disertační práce bylo vytvořeno 6 funkčních vzorků:

- roznášení příčnick,
- zkušební přípravek pro průhyb do 50 mm,
- zkušební přípravek pro průhyb do 100 mm,
- stabilizační komora,
- zvlhčovací box 1.0,
- zvlhčovací box 2.0.

Tyto funkční vzorky rozšířily laboratorní vybavení Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT.

Pro snadnější zpracování naměřených výsledků mechanických zkoušek bylo vytvořeno makro v programovacím jazyce Visual Basic, který je například implementován do programu Excel. Např. zkušební přípravek a příčnick byl použit Ing. Evou Šuhajdovou pro zpracování části její disertační práce.

## F.1 Přínos pro praxi

Přínosné pro praxi je experimentální ověření hodnot vybraných mechanických a elastických vlastností dřevin. Experimentálně ověřené hodnoty MOE, MOR a tlak rovnoběžně s vlákny lze použít do numerických výpočtů dřevěných konstrukcí u kterých je známa vlhkost, která se blíží hodnotám při kterých byly experimenty provedeny.

Pro snížení vlhkosti v dřevěné konstrukci lze použít aplikaci a úpravě postupu vysoušení s využitím EMW. Postup lze například použít při rekonstrukcích pozemních staveb, kde je část dřevěného prvku napadená zvýšenou vlhkostí nebo biotickými činiteli. Vysoušení zajistí snížení vlhkosti v ošetřovaném prvku a při dostatečné teplotě dojde i k zahubení škůdců. Po

realizaci vysoušení je nutné zajistit odstranění dotování vlhkosti. Tento problém je často u střech s porušeným střešním pláštěm, kam může zatékat a dochází tak k poškození nosné konstrukce krovu. Problémy se zvýšenou vlhkostí vznikají i u novostaveb např. špatným provedením parotěsné vrstvy, špatným návrhem nebo provedením odvětnání vzduchové mezery ve střešním plášti. Dalším rizikem dotující dřevěnou konstrukci vlhkostí je netěsné nebo poškozené vodovodní nebo kanalizační potrubí. U starších staveb také bývá často problém s dřevěnými trámy vytvářející stropní konstrukci. Trámy mají poškozené zhlaví. Tento problém vzniká tím, že není zajištěno obtékání vzduchu kolem zhlaví trámu, protože ve styku trámu s obvodovou konstrukcí je trám zazděný.

Při aplikování získaných hodnot a závěrů je potřeba zohlednit, že se obecně jedná o systém, který může být ovlivněn řadou vstupních parametrů, např. použitá aparatura, velikost povrchu, rozměr konstrukce apod. Proto je vhodné vždy tyto parametry při výpočtech a použití metody zohlednit.

## F.2 Přínos pro rozvoj vědního oboru

Pro další výzkum jsou velice cenné experimentálně provedené zkoušky při čtyřbodovém ohybu při různých vlhkostech vzorků. Hodnoty MOE a MOR lze implementovat do výpočtových modulů a podprogramů a využít je na zpřesnění numerických výpočtů. Část práce, kde dochází k porovnání difúzních modelů usnadní výběr nejvhodnějšího modelu pro vlastní výpočet dle rozsahu vlhkosti ve výpočtovém modelu.

S ohledem na vznik nových funkčních vzorků lze předpokládat vznik nových projektů zaměřených podobným směrem, které budou rozšiřovat poznání ve vědním oboru.

### F.2.1 Využití poznatků pro zpřesnění numerických modelů

Při numerických simulacích v programu ABAQUS pro experiment EXF byla používána naměřená data v projektu Durable Timber Bridges, který prováděla finská organizace VTT, na kterých probíhala spolupráce v rámci zahraničních stáží. Do numerických simulací byly implementovány i data obsahující dešťové strážky, ale v naměřených datech nebylo zřejmé jak dlouho byl vzorek tímto deštěm ovlivněn. K tomuto zjištění by mělo pomoci měření, které je instalováno ve výzkumném Centru AdMaS. V rozšíření experimentu EXF dojde ke zkoumání vlivu deště na různě skloněných dřevěných vzorcích. V tomto experimentu jsou osazeny vzorky smrku ztepilého (*Picea abies* L.) a borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Bude zkoumán vliv nasákavosti, způsobené povětrnostními vlivy na rozdílné druhy dřevin.

## G SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Abaqus: Abaqus/Standard, User's Manual. Version 6.14. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket (2014),
- [2] Adsorpce z kapalné fáze na tuhé látce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/adsorpce\\_z\\_kapalne\\_faze\\_na\\_tuhe\\_latce.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpce_z_kapalne_faze_na_tuhe_latce.html).
- [3] Adsorpce z plynné fáze na tuhé látce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/adsorpce\\_z\\_plynne\\_faze\\_na\\_tuhe\\_latce.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpce_z_plynne_faze_na_tuhe_latce.html).
- [4] Adsorpční hystereze. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/adsorpcni\\_hystereze.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpcni_hystereze.html).
- [5] BODIG, J. a B.A. JAYNE. Mechanics of Wood and Wood Composites. MST.EDU [online]. Missouri S&T, Rolla, MO 65409: Krieger Publishing, 1993 [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: <https://classes.mst.edu/civeng120/lessons/wood/>
- [6] Catman Data Acquisition Software – More than just Data Acquisition [online]. Darmstat: Company Headquarters, 2000 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/>
- [7] ČSN 49 0103 (490103) Dřevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1979.
- [8] ČSN EN 13183-1 (491016) Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
- [9] ČSN EN 384 (73 1712). Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2010.
- [10] ČSN EN 408 (73 1741). Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [11] DOHNAL, J., HRADIL, P., PĚNČÍK, J., Hygrothermal Simulation of Wood Exposed To the Effect of External Climate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 245. DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032087. ISSN 1757-8981. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/245/i=3/a=032087?key=crossref.ccc483e8062ca1dc24ea807f0d5ba7df>.
- [12] Dřevo, fyzikální a mechanické vlastnosti, vady dřeva, vlhkost a sušení dřeva. In: Humlnet [online]. 2008 [cit. 2016-08-17]. Dostupné z: [http://drevari.humlak.cz/data\\_web/Data\\_skola/HUdrevu/2.pdf](http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdrevu/2.pdf).
- [13] FORTINO, S., HRADIL, P., SIPPOLA, M., TORATTI, T., Hygro-thermal numerical models for stress-laminated timber decks. In: *COST TIMBER BRIDGE CONFERENCE CTBC 2014*. Biel, Switzerland: Bern University of Applied Sciences, Institute for Timber Construction, Structures and Architecture, 2014, s. 8. ISBN 978-3-9523787-4-8.
- [14] FRANDSEN, H.L., Selected Constitutive models for simulating the hygromechanical response of wood. Dissertation no. 10. Dep. of Civil Engineering, Aalborg University (2007); ISSN: 1901-7294.
- [15] HAVÍŘOVÁ, Z. *Dům ze dřeva*. Brno: ERA Group, 2006. ISBN 80-7366-008-3.
- [16] Historie jinak. *Zpracování kovů | Historie jinak* [online]. Nasavrky: Boii o.s., 2012 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.historiejinak.cz>.
- [17] Historie lidstva: průvodce dějinami našeho světa. *Pravěk - starší doba kamenná - paleolit: Učebnice dějepisu on-line* [online]. Uherské Hradiště: Učebnice dějepisu on-line, 2008 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://dejepis.pajka.info/index.php>.
- [18] HLADÍK, P., *Historický vývoj použití dřeva v konstrukcích*. Brno, 2006. Bakalářská práce. Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.

- [19] HORÁČEK, P.; FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA I. BRNO, MZLU V BRNĚ, 1998, 128 s., ISBN 80-7157-347-7.
- [20] HOUDEK, D., KOUDELKA, O., *SRUBOVÉ DOMY Z KULATIN*. 2. Brno: Era, 2007. ISBN 80-7366-064-4.
- [21] HOUŠKA, P., Držme se tradičních nátěrů!. *Dřevo & stavby, sruby & roubenky*. Praha: PRO VOBIS, 2012, (3/2012).
- [22] HRADIL, P., FORTINO S., METELLI, G., MUSCI A., DOHNAL J., FREDRIKSSON, M., Simulation of moisture diffusion in timber bridges exposed to rain. *ICTB 2017* [online]. Skeleftea, 2017, 28.6.2017, [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328602755\\_Simulation\\_of\\_moisture\\_diffusion\\_in\\_timber\\_bridges\\_exposed\\_to\\_rain](https://www.researchgate.net/publication/328602755_Simulation_of_moisture_diffusion_in_timber_bridges_exposed_to_rain)
- [23] KOLEKTIV AUTORŮ. *Děvařská technická pří.*. Praha: MÍR, novinářské závody, n. p., 1970. ISBN 04-821-70.
- [24] KRUS, M.; KIESSL, K.; DETERMINATION OF THE MOISTURE STORAGE CHARACTERISTICS OF POROUS CAPILLARY ACTIVE MATERIALS, MATERIALS AND STRUCTURES, ISSN 1871-6873, Kluwer Academic Publishers, 1998,
- [25] LUND FRANDBSEN, H. SVENSSON, S., (2007). Implementation of sorption hysteresis in multi-Fickian moisture transport. *Holzforchung*, 61(6), pp. 693-701. Retrieved 19
- [26] MIRIANON, F., FORTINO, S., TORATTI, T., *A method to model wood by using ABAQUS finite element software: Part 1. Constitutive model and computational details*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. ISBN 978-951-38-7107-9.
- [27] MUSCI, A., *EFFECTS OF MOISTURE CONTENT ON TIMBER STRUCTURAL ELEMENTS. CASE STUDY: VIHANTASALMI BRIDGE*. BRESCIA, 2015. Master thesis. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di matematica DICATAM. Relatore Ing. METELLI GIOVANNI.
- [28] NASSWETTROVÁ, A., ŠMÍRA, P., GROSSOVÁ, O., KŘIVÁNKOVÁ, S., Ztráta mechanické pevnosti dřevěných prvků konstrukcí působením dřevokazného hmyzu a jeho účinná likvidace. *Střechy, fasády, izolace*. Nakladatelství MISE, 2016, 23.(4.), 17-19. ISSN 1212-0111.
- [29] Nerostné suroviny a jejich využití - JIRÁSEK, J., VAVRO, M., *Výroba železa* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/index.html>.
- [30] NILSSON L., SANDBERG K.; A new model for wetting and drying of wood end-grain – with implications for durability and service-life, Paper prepared for the 42nd Annual Meeting, Queenstown, New Zealand, 2011.
- [31] Ormarsson, S. 1999. Numerical analysis of moisture-related distortions in sawn timber. Chalmers University of Technology. Dissertation.
- [32] PÁNEK, M., Poškození dřevěných konstrukcí biotickými a atmosférickými činiteli. *Materiály pro stavbu*. Business Media CZ, 2015, 21.(3.), 48-51. ISSN 1213-0311.
- [33] PĚNČÍK J., *Dřevěné segmentové schodiště s jednostranně zavěšenými stupni*. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2013. 185 s.
- [34] POŽGAJ, A. CHOVANEC, D. KURJATKO, S. BABIAK, M.; *Struktúra a vlastnosti dreva*, Bratislava, 1997, 488 s., ISBN 80-07-00960-4.
- [35] Stavebnictví 3000: nejvíce informací o stavebnictví v ČR. *Stavebnictví 3000: nejvíce informací o stavebnictví v ČR* [online]. Hradec Králové: Vega, 2014 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/>.
- [36] ŠUHAJDOVÁ, E. Experimentální výzkum v oblasti lepených lamelových prvků na bázi listnatých klimatolerantních dřevin. Brno, 2020. Disertační práce. VUT FAST v Brně.
- [37] TORATTI, T., Modelling the creep of timber beams. *Rakenteiden Mekaniikka*. 1992, 25(1), 24.

