



**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 Pěňčík, Ph.D.

**BRNO 2021**

### **Abstrakt**

V konstrukcích pozemních staveb se velmi často používá dřevo jako stavební materiál, popř. jej lze použít i pro doplňkové konstrukce např. jako obklad, stínící prvky, atd. Nejčastějšími zástupci dřevin, které se nachází v biotopu České republiky je smrk ztepilý (*Picea abies* L.) a borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Dřevo jako stavební materiál je oblíbený jak u architektů, tak i u investorů, kteří si přejí žít ve zdravém a ekologickém prostředí. Dřevěné konstrukce jsou oblíbené i u statiků pro svoje dobré mechanické vlastnosti a nízké hmotnosti, která je však závislá na vlhkosti. Vlastnosti dřeva jsou v každém přirozeném směru rozdílné a je potřeba s tím už v počátku návrhu konstrukce uvažovat. Cílem disertační práce je přispět k popisu chování mechanických charakteristik dřeva při změnách vlhkostních poměrů ve struktuře dřeva. V práci byly pro dosažení cílů použity různé experimentální zkoušky a numerické modelování. Experimentální zkoušky ověřovaly vybrané mechanické vlastnosti při různých vlhkostech vzorků vybraných dřevin. Získané hodnoty byly následně porovnávány s hodnotami dostupnými v odborné a vědecké literatuře, aby mohly tyto hodnoty být následně použity jako vstupní hodnoty do numerických výpočtů. Díky závěrům disertační práce dojde ke zpřesnění výpočtů a dalších analýz.

### **Klíčová slova**

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

### **Abstract**

In building structures wood is very often used as construction material and can also be used for supplemental non-supporting structures, e.g. as wood panelling, screening elements, etc. The most common woody plant species that can be found in the biotope of the Czech Republic are Norway spruce (*Picea abies* L.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Wood as construction material is popular in architect community as well as this material like also investors, who prefer living in healthy and natural environments. Wooden structures are also popular with structural engineers for their good mechanical properties and low weight, which, however, depends on moisture. Wood properties vary in every natural way and need to be taken into account at the beginning of the designing process. This dissertation aims to contribute to the description of mechanical characteristics of wood during changes of moisture content in the wood structure. Various experimental tests and numerical modelling were used in the thesis in order to reach the aims. The experimental tests examined mechanical properties at different sample moisture of selected woody plant species. Subsequently, the obtained values were compared with values

---

available in specialist and scientific literature, so that these values could subsequently be used as input values for numeric calculations. The conclusions of the dissertation will contribute to more accurate calculations and further analysis.

**Keywords**

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

---

**Bibliografická citace:**

Ing. Jakub Dohnal. Brno, 2021. 145 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Pěňčík, Ph.D.

---

**Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Janu Pěňčíkovi, Ph.D. za odborné vedení a věcné připomínky v průběhu zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali při zpracování práce.

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem: Studium teplotně vlhkostních procesů v konstrukcích moderních dřevostaveb, zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 12. 2021

---

Ing. et Ing. Jakub Dohnal  
autor práce

---

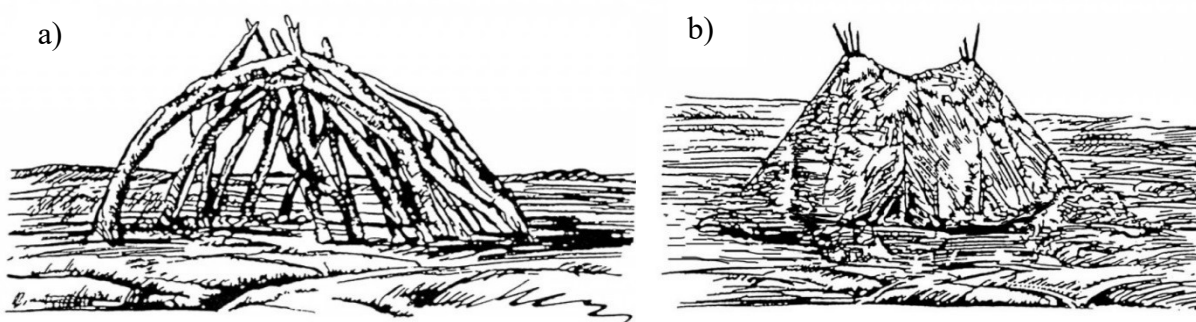
# OBSAH

<b>A</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>B</b>	<b>SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	<b>16</b>
B.1	STAVBA DŘEVA .....	16
B.2	MIKROSKOPICKÁ STAVBA DŘEVA .....	16
B.3	MAKROSKOPICKÁ STAVBA DŘEVA .....	18
B.4	HYGROSKOPIE DŘEVA .....	19
B.4.1	<i>Sorpční křivka s hysterezí</i> .....	28
B.5	VODA VE STRUKTUŘE DŘEVA .....	29
B.5.1	<i>Nasákavost dřeva</i> .....	31
B.6	ANIZOTROPIE .....	32
B.6.1	<i>Lineárně pružný materiál</i> .....	34
B.6.2	<i>Izotropní materiálový model</i> .....	35
B.6.3	<i>Ortotropní materiálový model</i> .....	36
B.6.4	<i>Anizotropní materiál</i> .....	38
B.7	METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI VE DŘEVĚ .....	38
B.7.1	<i>Prímé metody</i> .....	38
B.7.1.1	Gravimetrická (váhová) metoda .....	38
B.7.1.2	Destilační metoda (metoda CaC <sub>2</sub> ) .....	39
B.7.2	<i>Nepřímé metody</i> .....	39
B.7.2.1	Odporová metoda .....	40
B.7.2.2	Kapacitní metoda .....	41
B.7.2.3	Radiometrická metoda .....	41
B.8	ELEKTROMAGNETICKÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ (EMW) .....	42
B.8.1	<i>Vysoušení pomocí EMW</i> .....	44
B.9	DIFÚZNÍ MODEL Y POPISUJÍCÍ PROSTUP VODY VE DŘEVĚ .....	46
B.9.1	<i>Difúzní model Toratti</i> .....	47
B.9.2	<i>Difúzní model Nilsson &amp; Sandberg</i> .....	49
B.10	POPIS TRANSPORTU VODY VE DŘEVĚ .....	52
B.10.1	<i>Jednofázový model</i> .....	52
B.10.2	<i>Vícefázový model</i> .....	53
B.11	HODNOTY VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ DŘEVA DLE LITERATURY .....	54
B.12	ZPŮSOB ZÍSKÁNÍ KLIMATICKÝCH DAT .....	55
B.13	ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ V MKP .....	58
<b>C</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>59</b>
<b>D</b>	<b>MATERIÁL A METODIKA</b> .....	<b>60</b>
D.1	EXPERIMENT 1 (EX1) - STANOVENÍ VYBRANÝCH MECHANICKÝCH A ELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ ZVOLENÝCH DŘEVIN .....	61
D.1.1	<i>Mechanické testování</i> .....	66
D.1.1.1	Stanovení lokálního modulu pružnosti v ohybu (MOE) .....	69
D.1.1.2	Pevnost v ohybu .....	70
D.1.1.3	Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny .....	70
D.2	EXPERIMENT 2 (EX2) – EXPERIMENT VYSOKÉHO NAVLHÁNÍ A NÁSLEDNÉHO VYSOUŠENÍ POMOCÍ EMW .....	72
D.3	MODELOVÁNÍ STRUKTURY DŘEVA POMOCÍ PROGRAMU ABAQUS .....	75
D.3.1	<i>Modelování pomocí ABAQUS</i> .....	75
D.3.2	<i>Podprogramy v programu ABAQUS</i> .....	77
D.3.2.1	Podprogram DFLUX .....	78
D.3.2.2	Podprogram UMAT .....	79

D.3.2.3	Vstupní data pro výpočet v programu ABAQUS .....	80
D.4	OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	82
<b>E</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>87</b>
E.1	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EX1 .....	87
E.1.1	<i>Dráha zatížení pro testování série 1 – smrk ztepilý</i> .....	87
E.1.2	<i>Dráha zatížení pro testování série 1 – borovice lesní</i> .....	88
E.1.3	<i>Dráha zatížení pro testování série 2 – smrk ztepilý</i> .....	89
E.1.4	<i>Dráha zatížení pro testování série 2 – borovice lesní</i> .....	90
E.1.5	<i>Dráha zatížení pro testování série 3 – smrk ztepilý</i> .....	91
E.1.6	<i>Dráha zatížení pro testování série 3 – borovice lesní</i> .....	92
E.1.7	<i>Druhy porušení při čtyřbodovém ohybu</i> .....	93
E.1.8	<i>Druhy porušení při tlakových zkouškách</i> .....	94
E.1.9	<i>Výsledné hodnoty získané z experimentu EX1</i> .....	96
E.1.10	<i>Výsledky zkoušky pro čtyřbodový ohyb</i> .....	97
E.1.10.1	Série 1 .....	97
E.1.10.2	Série 2 .....	98
E.1.10.3	Série 3 .....	99
E.1.11	<i>Porovnání lokálního ohybového modulu E pro všechny série</i> .....	100
E.1.12	<i>Výsledky tlaku rovnoběžně s vlákny <math>f_{c,0}</math> pro všechny série</i> .....	102
E.1.13	<i>Diskuze nad výsledky experimentu EX1</i> .....	103
E.2	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EX2 .....	104
<b>F</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>109</b>
F.1	PŘÍNOS PRO PRAXI .....	110
F.2	PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU .....	111
F.2.1	<i>Využití poznatků pro zpřesnění numerických modelů</i> .....	111
<b>G</b>	<b>ZKUŠENOSTI V RÁMCI MOBILITNÍCH PROGRAMŮ .....</b>	<b>112</b>
G.1	EXPERIMENT ZE STÁŽÍ VE FINSKU (EXF) - EXPERIMENT S NAVLHÁNÍM IN-SITU .....	112
G.2	VIHANTASALMI BRIDGE .....	113
G.3	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EXF .....	117
G.4	ZÁVĚR EXPERIMENTU EXF .....	122
<b>H</b>	<b>NAVAZUJÍCÍ VÝZKUM .....</b>	<b>123</b>
H.1	ROZŠÍŘENÍ EXPERIMENTU EXF .....	123
H.2	TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY (TAČR) .....	125
<b>I</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>126</b>
<b>J</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>135</b>
J.1	SEZNAM VYBRANÝCH NEZNÁMÝCH .....	135
J.2	SEZNAM ZKRATEK .....	137
<b>K</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>138</b>
<b>L</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>143</b>
<b>M</b>	<b>SEZNAM PUBLIKOVANÝCH ČLÁNKŮ .....</b>	<b>144</b>

## 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 [53]. Dřevo bylo jedním z prvních materiálů, které člověk dokázal využívat, a také je používal ke stavbě svých obydlí [105]. 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. zobrazených na (Obr. 1). První typ stavby zobrazený na (Obr. 1 a) byl vyroben z větví a byl zakrytý větvemi a trávou. Druhá stavba na (Obr. 1 b) má stejnou konstrukci, ale střecha stavby byla doplněna o kožešiny z ulovených zvířat.



Obr. 1: První dřevěné obydlí, a) první typ nejjednodušších staveb, b) stavba s kožešinami na povrchu. Převzato z [105].

Postupem času, díky rozvoji zpracování jiných materiálů [53], hlavně kovu [52] a [86], 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 [54]. Vývojem docházelo také k změnám ve skladbách konstrukcí stěn. Z počátku se na sebe vrstvil jednotlivé klády, které se postupem času upravovaly drážkami [50] pro lepší spojení a větší těsnost stavby. Vznikly tak stavby srubů, zobrazené na (Obr. 2) [72] a [112]. Díky rozvoji nových řemesel, např. tesařství se dřevo stále více a dokonaleji opracovávalo. Tesař měl k dispozici širokou sekeru, tzv. bradatici dle [67], pomocí které otesával kulatinu a vytvářel z ní trámy [67]. Vynález této sekery dal možnost vzniku roubených staveb, které se staví vrstvením tesaných trámů na sebe.

Dřevo se samozřejmě nepoužívalo jen na stavby pro bydlení a skladování, ale používalo se také při výstavbě konstrukcí různých lávek, mostů a jiných staveb užívaných v každodenním životě.



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 [60], aby byla dřevěná konstrukce stěn co nejvíce chráněná před deštěm a tím byla prodloužena jejich životnost. Dřevo se natíralo krví volů, aby déle vydrželo [61]. 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. Příklad srubu velikosti rodinného domu je zobrazen na (Obr. 4).



Obr. 4: Rodinný srub v Jihlavě. Zdroj autor.

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.

Vysokou oblíbenost a využitelnost má dřevo v rámci architektury, a tak s jeho pomocí vznikají jedinečné stavby, jako například Kaple ticha [35] zobrazena na (Obr. 5), která vytváří moderní dominantu uprostřed rušného centra v Helsinkách ve Finsku.



Obr. 5: Kaple ticha v Helsinkách, Finsko, a) je fotografie z exteriéru a, b) je fotografie z interiéru. Zdroj autor.

Srubové stavby jsou velice oblíbené v Kanadě i severských státech Evropy. V České republice se lze s těmito stavbami také setkat avšak v menší míře. Jedním z důvodů, proč si investor volí jiný typ stavby je její nevyhovující součinitel prostupu tepla  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]. Důvodem, proč srubová konstrukce vyhovívá na prostup tepla je tloušťka ložných spar jednotlivých klád. Stanovení hodnoty součinitele prostupu tepla  $U$  je poměrně složité. Postup výpočtu součinitele prostupu tepla srubovou stěnou je uveden např. ve zdroji [51], kde byla hodnota součinitele prostupu tepla stanovena na  $U = 0,374 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . Pro výpočet byly uvažovány okrajové podmínky kdy srubová stěna byla vytvořena z klád s průměrem 350 mm v konečno-prvkovém programu ANSYS [5], a obě strany spáry byly opatřeny paměťovou páskou a styk byl vyplněn minerální vatou. Zdroj [104] uvádí výsledky laboratorního měření z laboratoře Centra stavebního inženýrství a.s. ve Zlíně, kde byla stanovena hodnota tepelného prostupu srubovou konstrukcí. Měřená konstrukce byla vytvořená z kulatin o průměru 300 mm s ložnou sparou o šířce 80 mm mezi jednotlivými kládami. Hodnota z laboratorního měření byla určena na hodnotu  $U = 0,33 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  [104]. Česká technická norma ČSN 73 0540-2, Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky [19] platná do roku 2006 udávala jako hodnotu odpovídající prostupu tepla stěny  $U_{N,20} = 0,38 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . Tuto hodnotu tedy srubová stěna splnila. Ovšem norma ČSN 73 0540-2, Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky [19] platná od roku 2011 zpřísnila požadavky na tepelný prostup konstrukcí a nyní požaduje hodnotu  $U_{N,20} = 0,30 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . To znamená, že srubová stěna nedokáže splnit požadavek normy na prostup tepla obvodovou konstrukcí.

Oproti srubům mají roubenky lepší tepelně technické parametry obvodové konstrukce, protože mají stejnou tloušťku po celém průřezu a nejsou oslabeny v místě ložné spáry, a tak roubenka může být náhradní alternativa pro environmentálně uvažující investory, kteří chtějí bydlet v celodřevěné konstrukci a splňovat normu ČSN 73 0540-2 [19]. U roubenek je nyní také možné využít sendvičové konstrukce, kde je mezi dva hranoly vložená tepelná izolace [92]. Skladba sendvičové roubené konstrukce je zobrazena na (Obr. 6). Problémem u této skladby je pořadí umístění parotěsnících vrstev od interiéru k exteriéru, které neodpovídá logice umístění parotěsné vrstvy. U této konstrukce je problematické umístění silnějšího dřevěného prvku na exteriérovou stranu konstrukce. Uvedené řešení způsobuje, že se s tloušťkou stěny od interiéru snižuje difúzní propustnost, což může způsobit, že procházející pára za určitých okrajových podmínek začne kondenzovat na rozhraní minerální vaty a silnějšího exteriérového dřevěného prvku [31].



Obr. 6: Sendvičová roubená konstrukce. Převzato z [92].

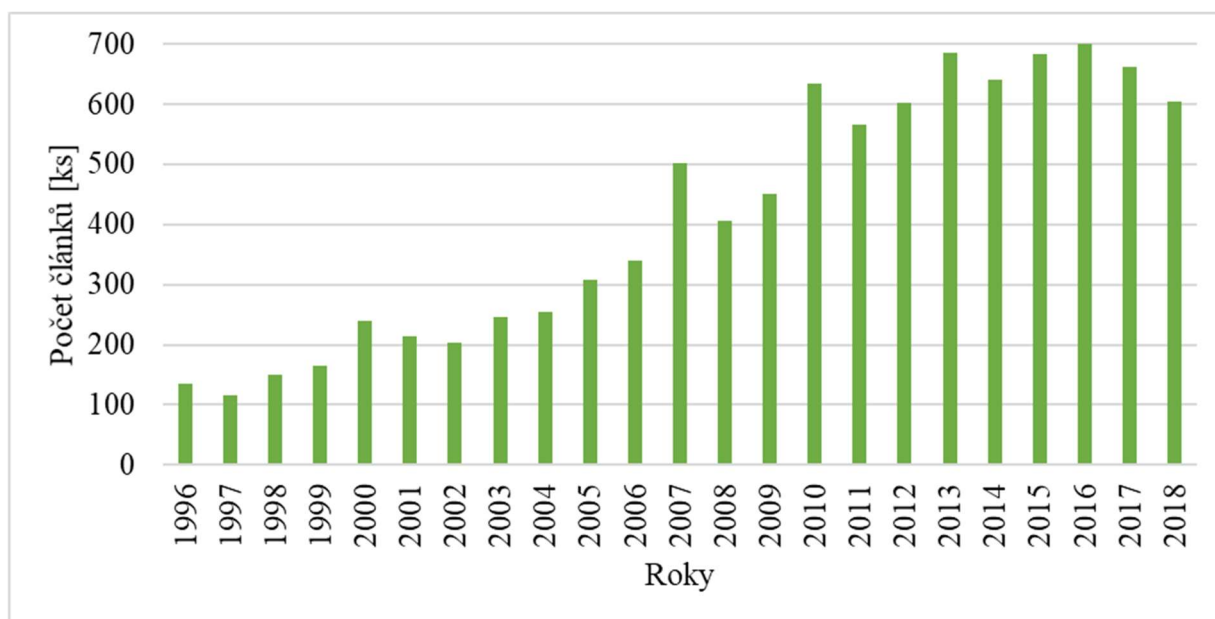
V konstrukcích pezemních staveb lze dřevo použít při výstavbě nákupních hal, sportovišť nebo bytových domů. Nejvyšší bytový dům ze dřeva je postavený v Norsku viz (Obr. 7) jak uvádí [40]. V zahraničí jsou tyto konstrukce běžnou součástí všech typů staveb a jejich obliba stále roste. U nás zatím tento trend není z důvodů přísných požárních norem ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty [20], ČSN 73 0833 Požární bezpečnost staveb – Budovy pro bydlení a ubytování [22] a ČSN 73 0831 Požární bezpečnost staveb – Shromažďovací prostory [21], 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.



Obr. 7: Nejvyšší dřevěný bytový dům na světě k roku 2017, Bergen Norsko. Převzato z [40].

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.

Pro zjištění aktuálnosti tématu této práce byl využit vyhledávač Google scholar [47]. Při zadání slovního spojení „wood moisture“ do Google scholar dostaneme přibližně 2 240 000 výsledků k 1. 12. 2018. Z toho výběr článků od roku 1996 do roku 2018 obsahuje celkem 9 180 kusů [47]. Počty výsledků článků se slovním spojením „wood moisture“ v jednotlivých letech jsou patrné z (Obr. 8). Trend vyplývající z (Obr. 8) popisuje zvýšený nárůst zájmu o problematiku vlhkosti dřeva.



Obr. 8: Počty článků se slovním spojením „wood moisture“ v letech 1996 – 2018. Převzato z [47].

## 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 [43]. Jiné týmy se snaží ochránit historické památky před jejich dalším napadením biotickými činiteli jak je např uvedeno v [85] a [94]. Výzkum probíhá od nanostruktury tj. od velikosti jednotlivých buněk např. [42] a [56], které tvoří dřevo jako celek, až po makrostrukturu např. [69].

### B.1 Stavba dřeva

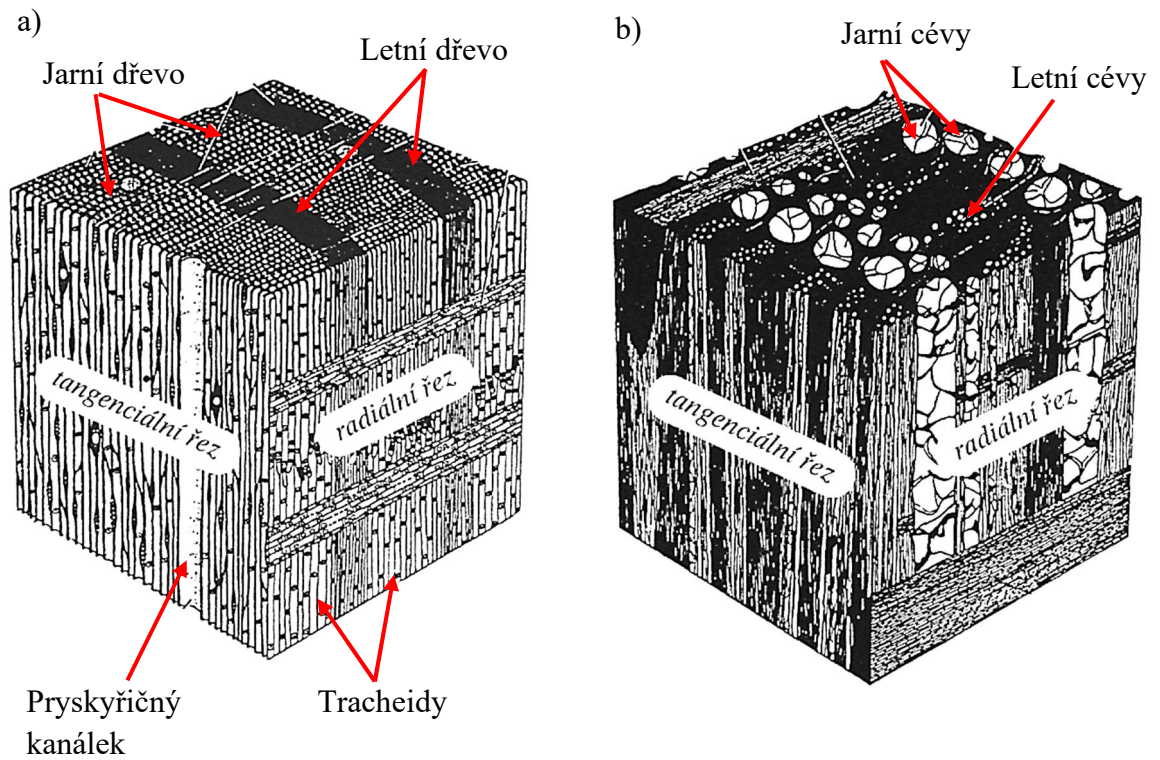
Dřevo je přírodní materiál, který je tvořen celulórou (50 %), ligninem (26 – 35 %), hemicelulórou (22 – 28 %) a doprovodnými složkami [7], [58], [63] a [64]. Základní složkou buněčných stěn dřeva je celulóza. Jedná se o látku bílé barvy, která není rozpustná ve vodě. Vyšší procento celulózy obsahují jehličnaté dřeviny než listnaté dřeviny [7] a [84].

### B.2 Mikroskopická stavba dřeva

Dřevo je podle [34] složeno z:

- Lignofilních vláken, které jsou hlavně u listnatých dřevin. Jedná se o odumřelé buňky, které vyztužují dřevo a dodávají mu pevnost.
- Buněk tracheid a trachejí, které zajišťují transport vody a živin. U jehličnatých dřevin jsou tracheidy, které jsou vidět na (Obr. 9 a) a u listnatých dřevin jsou tracheje (Obr. 9 b).
- Parenchymatických buněk.

U jehličnatých dřevin oproti listnatým dřevinám jsou i patrné pryskyřičné kanálky, jak je vidět na (Obr. 9 a). Na tomto obrázku je dobře rozpoznatelné rozhraní mezi jarním a letním dřevem v případě jehličnatého dřeva a v případě listnatého dřeva je vidět rozdíl mezi jarními a letními cévami.



Obr. 9: Stavba jehličnatého a) a listnatého b) dřeva. Převzato z [34] a doplněno.

### B.3 Makroskopická stavba dřeva

Na (Obr. 10) je zobrazený radiální řez, na kterém jsou patrné letokruhy, které vytvářejí nejčastěji tvary blízké kružnicím. Letokruhy jsou vytvářené během roku a jsou tvořeny jarní a letní částí. Jarní dřevo má větší tloušťku přírůstků než dřevo letní [49], i když buňky jarního dřeva jsou tenčí než buňky letního dřeva [80]. To je způsobeno potřebou dostat co nejvíce živin na jaře do celého stromu [34] a [100].

Z makroskopického hlediska dřeviny lze dělit na jádrové a bělové. Mezi zástupce bělových dřevin patří např. bříza bělokora (*Betula pendula* L.) [73] (Obr. 10), olše lepkavá (*Alnus glutinosa* L.) [73], javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.) [73] apod. Bělové dřeviny neobsahují jádrové dřevo. Mezi jádrové dřeviny lze zařadit převážně všechny jehličnany jako např. smrk ztepilý (*Picea abies* L.) [73], borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) [73] na (Obr. 10), ale i některé listnaté stromy např. dub letní (*Quercus robur* L.) [73] apod. Na (Obr. 10) je bělové dřevo zabarveno dřevozbarvujícími houbami, které dřevo často postihuje. Dřevozbarvující houby postihují zejména borovice.



Obr. 10: Radiální řez s viditelnými letokruhy a patrným rozdílem jádrového a bělového dřeva. Dřevo borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Zdroj autor.

Bělové dřevo slouží k transportu vody a živin [80] z čehož podle [58] a [80] vyplývá, že jádrové dřevo je sušší a pevnější. Přítomnost bělového dřeva se nejvíce projeví v radiálním směru. Tato skutečnost není příliš prozkoumána z důvodů, že je silně závislá na stromu a jeho vývoji, a nelze tedy tyto změny snadno reprodukovat ve výpočetním nástroji [80]. Makroskopickou strukturu dřeva ovlivňuje i pozice stromu v porostu. Strom vyskytující se na kraji lesa bude mít více větví

a tedy i suků. Krajiní strom byl vystaven větším náporům větru a bude mít vytvořené reční dřevo, jak uvádí [34] na rozdíl od stromu, který je hlouběji v lesním porostu.



Obr. 11: Radiální řez bělovým dřevem břízy bělokoré (*Betula pendula* L.). Zdroj autor.

## B.4 Hygroskopie dřeva

Dřevo patří do skupiny hygroskopických materiálů [113]. Jedná se o materiál, který má schopnost měnit svoji vlhkost podle okolního prostředí díky absorpci vody [58]. Hygroskopicitu se u dřeva projevuje přijímáním nebo odparem vody do okolního prostředí. Dřevo bude vodu přijímat i v případě, že se bude vyskytovat ve vlhkém prostředí, jak uvádějí zdroje [58] a [60]. V případě že dřevo bude v sušším prostředí, nastane opačný směr toku vlhkosti a dřevo začne vodu obsaženou ve své struktuře distribuovat do okolního suššího prostředí [34]. Tento jev je odvislý od struktury dřeva popsané výše.

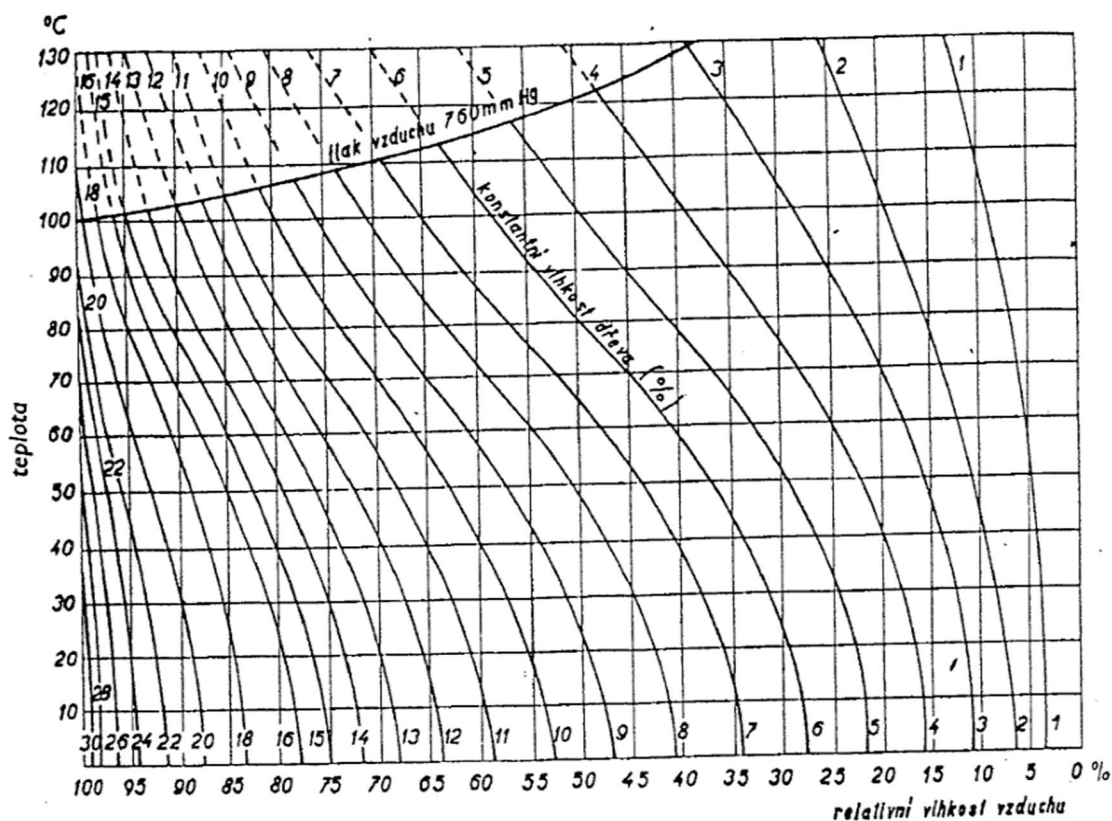
Dřevo je kapilárně-porézní materiál s průměrnou pórovitostí kolem 50 – 60 % v závislosti na hustotě dřeva [58]. Je tvořen velkým množstvím navzájem spojených kapilár ve formě např. tracheid [70]. Zdroj [70] uvádí, že šířka kapilár ovlivňuje, jak vysoko dokáže voda vystoupat za stejných okrajových podmínek. Důsledkem značné pórovitosti dřeva je velký vnitřní povrch, který se v závislosti na hustotě dřeva pohybuje kolem 100 – 300 m<sup>2</sup>/g sušiny u suchého dřeva [58].

Vnitřní povrch může absorbovat vodní páru obsaženou v okolním vzduchu a díky kapilárním transportům může také přijímat kapaliny např. vodu, impregnaci nebo také i lepidlo. Měrný

vnitřní povrch dřeva  $S$  lze určit z vlhkosti monomolekulární sorpce  $w_M$  dle vztahu (1) převzatého z [58], ve kterém  $S$  představuje měrný povrch dřeva,  $M$  molární hmotnost vody,  $N$  Avogadrova konstanta,  $\rho$  hustotu vody a  $w_M$  maximální vlhkost při monomolekulární sorpci. Proměnné s vysvětlením významu a jejich jednotky jsou uvedeny v kapitole J.1.

$$S = \sqrt[3]{\left(\frac{6M}{\pi\rho N}\right)^2 \frac{Nw_M}{M}} \quad (1)$$

Hygroskopicitu dřeva lze popsat několika různými způsoby. Například lze stanovit z hygroskopických křivek, které jsou zobrazeny na (Obr. 12), kde podle teploty okolního vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu za určitého tlaku vzduchu lze dovést relativní vlhkost dřeva [34]. Při ustálených teplotních a vlhkostních poměrech nastává mezi vlhkostí dřeva a vlhkostí okolního vzduchu rovnováha. Vlhkost, pro kterou toto platí se nazývá rovnovážná vlhkost. Rovnovážnou vlhkost lze obecně definovat jako vlhkost látky, kterou přijme ze vzduchu, který ho obklopuje při ustálených teplotních a vlhkostních podmínkách, jak je uvedeno například v [32], [43], [82], a [109].



Obr. 12: Křivky hygroskopické rovnováhy dřeva. Převzato z [34].

Rovnovážná vlhkost  $w_{ms}$  charakterizuje ustálenou vlhkost v čase dle podmínky (2) dle [109]:

$$w_{ms} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} w(t, \varphi), \left| \begin{array}{l} t \\ \varphi \end{array} \right|, \quad (2)$$

kde  $w_{air}$  je hmotnostní rovnovážná vlhkost,  $w$  vlhkost,  $t$  teplota okolního vzduchu ve °C,  $\tau$  čas a  $\varphi$  relativní vlhkost vzduchu. Ve vztahu (2) platí, že teplota  $t$  a vlhkost  $\varphi$  jsou konstanty.

Podmínka, aby byla teplota  $t$  a vlhkost  $\varphi$  konstantní je v reálném prostředí nepravděpodobná. Proto existují různé úpravy, které jsou popsány např. vztahem (3) dle [109]

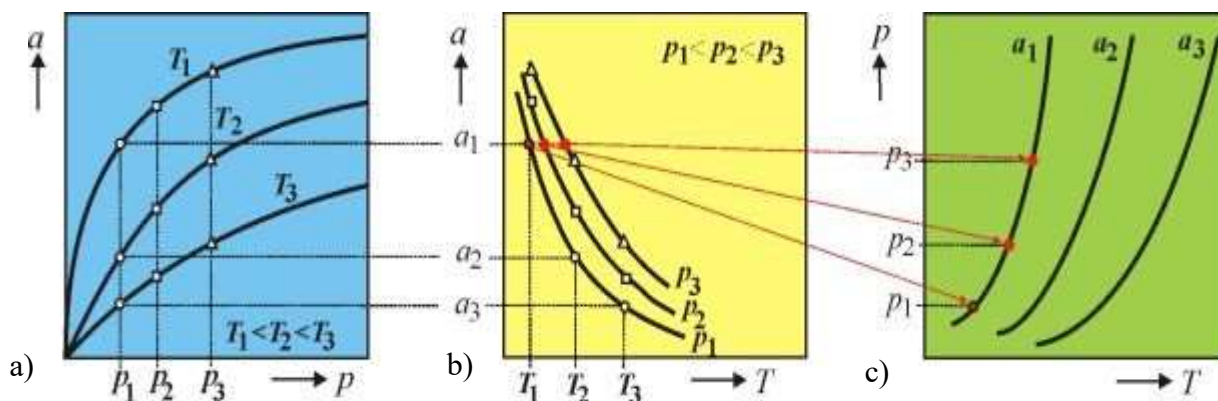
$$w_{ms} = f(\varphi) \wedge t = konst \quad (3)$$

Je-li parciální tlak vodní páry v porézní látce nižší než v okolním prostředí, dochází k pohlcování vlhkosti dřevem a hromadění vlhkosti na rozhraní plynné a pevné fáze hmoty. V případě, že je parciální tlak vodní páry ve dřevě větší, uvolňují se vodní páry z materiálu až do vyrovnání s parciálním tlakem vodní páry v ovzduší. Pro tento jev, vznikající vlivem mezi povrchovými silami, se používá název *sorpce* [103]. Jde o společné označení pro absorpci a adsorpci jak uvádí zdroj [103]. *Absorbce* podle [103] popisuje objemové vstřebávání a *adsorpce* podle stejného zdroje [103] popisuje povrchové pohlcování plynné nebo kapalně vrstvy povrchovou vrstvou jiné látky.

Adsorpce je způsobena Van der Waalsovými silami, kterými se navzájem přitahují molekuly kapalin a plynů. Adsorpce plynů na tuhých látkách je množství plynu, vyjádřené v molech jako hmotnost s označením  $a$  nebo je tato hodnota uvedena v objemu  $V$ , přepočítaný na normální podmínky, které je naadsorbované na jednotce hmotnosti pevné látky. Adsorbované množství je závislé na více faktorech např. na velikosti povrchu, parciálním tlaku nebo teplotě. Adsorpce je charakterizována vzájemnou závislostí adsorbovaného množství, teploty a rovnovážného tlaku adsorbujícího plynu, jak je uvedeno podle [3] ve vztahu (4).

$$f(a, p, T) = 0 \quad (4)$$

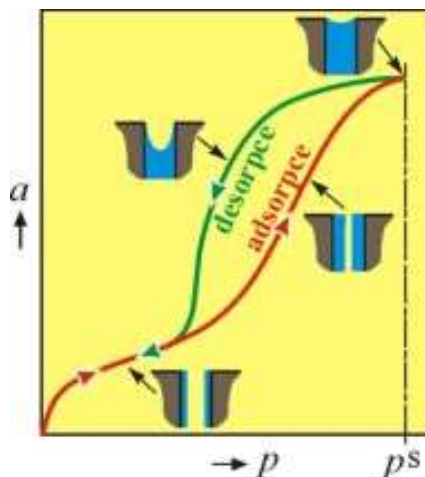
Nejčastěji jsou měřeny adsorpční izotermy [3], které jsou zobrazeny na (Obr. 13 a). Při konstantní teplotě se měří rovnovážný tlak plynu a adsorbované množství. Rovněž se experimentálně stanovují adsorpční izobary [3], tj. změna adsorbovaného množství s teplotou při konstantním rovnovážném tlaku plynu, které je možno také sestavit z izoterem naměřených při různých teplotách, zobrazené na (Obr. 13 b). Z těchto závislostí se konstruují adsorpční izostery [3], které jsou uvedeny na (Obr. 13 c), tj. závislosti rovnovážného tlaku plynu na teplotě při konstantním adsorbovaném množství.



Obr. 13: Adsorpční izoterma, adsorpční izobara a adsorpční izostera. Převzato z [3].

Při adsorpci existuje forma kapalné fáze i tuhé látky. Při styku tuhých látek s kapalinami je k povrchu tuhé látky vázána vrstva molekul kapaliny – dochází k adsorpci. Adsorbovaná vrstva se nazývá lyosféra [2], která se při vzájemném pohybu tuhé látky a kapaliny nepohybuje s kapalinou, ale lpí na pevném povrchu. Molekuly kapaliny v této vrstvě jsou vlivem silového pole tuhé látky stlačené [2].

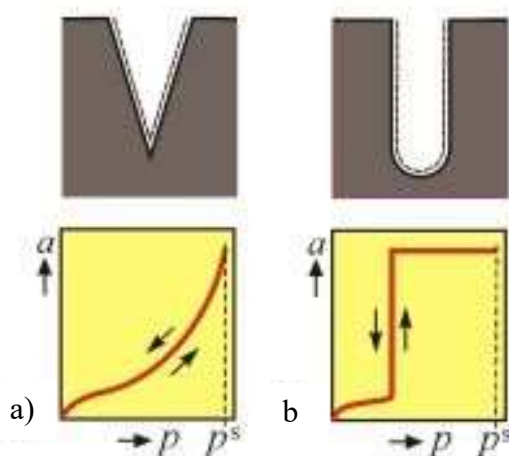
Zdroj [4] uvádí, že adsorpční hysteréze je děj, který nastává při adsorpci z plynné fáze na některých porézních adsorbentech, ke kterým patří i dřevo. Průběh adsorpční izotermy při adsorpci a při desorpci není totožný v oblasti zobrazené na (Obr. 14), kde se uplatňuje kapilární kondenzace. Pro stejnou relativní vlhkost vzduchu je podle [118] vlhkost dřeva vyšší při desorpci než při adsorpci vody v rozmezí  $w = 30 - 90 \%$  o 2,5 až 3,5 %. Rozdíl mezi adsorpcí a desorpcí se zmenšuje při přibližování se k 0 % a 100 % relativní vlhkosti vzduchu, kde klesá až na nulovou hodnotu [78]. Tato ireverzibilita adsorpčně-desorpčního procesu, zvaná hysteréze, se projevuje, jestliže vyprazdňování pórů probíhá jinak než jejich zaplňování. Na (Obr. 14) je na ose  $x$  uveden  $p$  partiální tlak a na ose  $y$  je  $a$  hmotnost adsorbovaného plynu v molech,  $p^s$  je rovnovážný tlak nasycené páry.



Obr. 14: Adsorpční izoterma s hysterézní smyčkou. Převzato z [4].

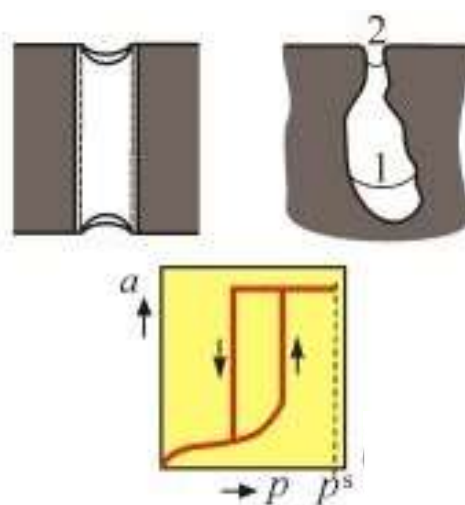
Z tvaru hysterézní smyčky, tj. z rozdílu adsorbovaného množství plynu při desorpci a adsorpci při určité hodnotě tlaku, je možné určit objem kondenzací zaplněných pórů a usuzovat na rozměry a tvar pórů.

Tvar hysterézní křivky při kapilární kondenzaci je závislý na tvaru póru. U kuželového póru zobrazeného na (Obr. 15 a) se kondenzace začne vytvářet ve spodní, nejužší části póru. Vytvoří se zde meniskus s minimálním poloměrem. Zkondenzovaná pára stoupá do širší části póru. Aby pára dále kondenzovala, musí tlak dále stoupat [65]. Při snižování tlaku dochází k desorpci; průběh izotermu v obou směrech je v tomto případě shodný; adsorpční izoterma hysterézi nejeví. Ve válcovém póru, který je zobrazen na (Obr. 15 b), na jednom konci uzavřeném (tvar zkumavky) se u dna opět tvoří meniskus, ale na rozdíl od předchozího případu bude poloměr menisku konstantní, a proto i plnění pórů proběhne za konstantního tlaku a desorpce probíhá opět po stejné křivce.



Obr. 15: Různé tvary pórů a tomu odpovídající hysterézní smyčka. Převzato z [4].

Ve válcovém póru otevřeném na obou koncích nemůže vzniknout podle [4] a [70] kulový meniskus. Ke kondenzaci může docházet pouze na vnitřním válcovitém povrchu, a to při tlaku, který je větší než u kulového menisku téhož poloměru, protože jeden z hlavních poloměrů je pro válcovou plochu nulový. Tloušťka kapalně vrstvičky při kondenzaci vzrůstá a poloměr póru se zmenšuje až se pór úplně zaplní. K desorpci pak dochází z kulovitého menisku. Závislost adsorbovaného množství na tlaku je v tomto případě odlišná při adsorpci a při desorpci, vše je zobrazeno na (Obr. 16). Adsorpční hystereze se projevuje také u adsorbentů s tzv. lahvovitými póry [97], v nichž při zaplňování póru rozhoduje o velikosti kondenzačního tlaku větší poloměr menisku uvnitř póru označeného 1, po úplném zaplnění póru pak o desorpci rozhoduje malý poloměr v úzkém hrdle póru s označením 2.



Obr. 16: Různé tvary pórů a tomu odpovídající hysterézní smyčka. Převzato z [4].

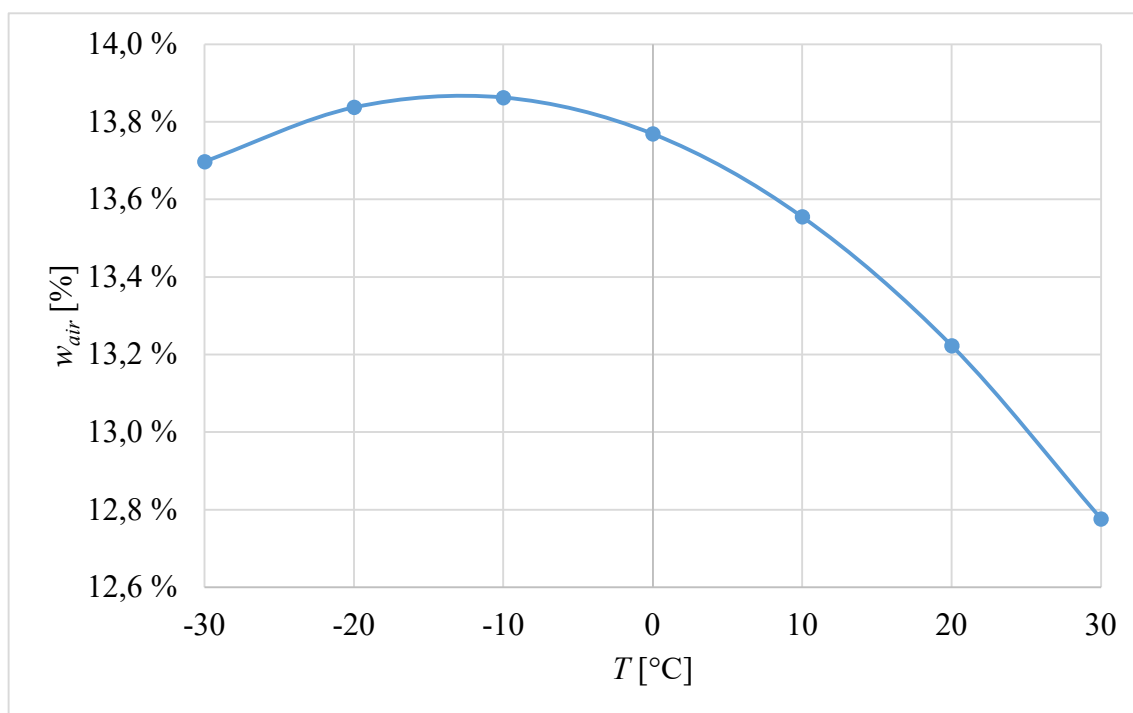
Pro práce vyžadující vyšší přesnost se dřevem je důležité stanovit vlhkost obsaženou ve struktuře dřeva, např. při numerických výpočtech, stanovení mechanické odolnosti apod. Vlhkost lze stanovit několika způsoby. Lze použít diagram viz (Obr. 12), kde na základě teploty, tlaku, relativní vlhkosti vzduchu lze odečíst relativní vlhkost dřeva. V případě potřeby stanovení hodnoty relativní vlhkosti dřeva pro rovnovážnou vlhkost vzduchu lze použít vztah (5) uvedený v [80] nebo [82]. Ve vztahu (5) je  $T$  teplota [K],  $w$  relativní vlhkost vzduchu [-] a  $w_{air}$  rovnovážná vlhkost [-].

$$w_{air} = 0,01 \left( \frac{-T \cdot \ln(1-w)}{0,13 \left( \frac{1-T}{647,1} \right)^{-6,46}} \right)^{\frac{1}{100 \cdot T^{-0,75}}} \quad (5)$$

Rovnovážná vlhkost je závislá dle vztahu (5) na teplotě, vlhkosti a dalších faktorech, kterými může být např. přesnost vstupní hodnoty do vztahu (5) jak je uvedeno v [2], [3] a [4]. V (Tab. 1) jsou vypočteny hodnoty pro teploty z intervalu od  $-30\text{ °C}$  do  $+30\text{ °C}$ . Relativní vlhkost vzduchu byla uvažována o hodnotě 70 %. Zjištěné hodnoty rovnovážné vlhkosti jsou uvedeny v (Tab. 1), a také jsou zobrazeny na (Obr. 17).

Tab. 1: Stejná vlhkost  $w_{air} = 70\%$  pro rozdílné teploty.

$T$ [K]	$T$ [°C]	$w$ [%]	$w_{air}$ [%]
243,15	-30	70	13,698
253,15	-20		13,837
263,15	-10		13,863
273,15	0		13,769
283,15	10		13,556
293,15	20		13,223
303,15	30		12,777

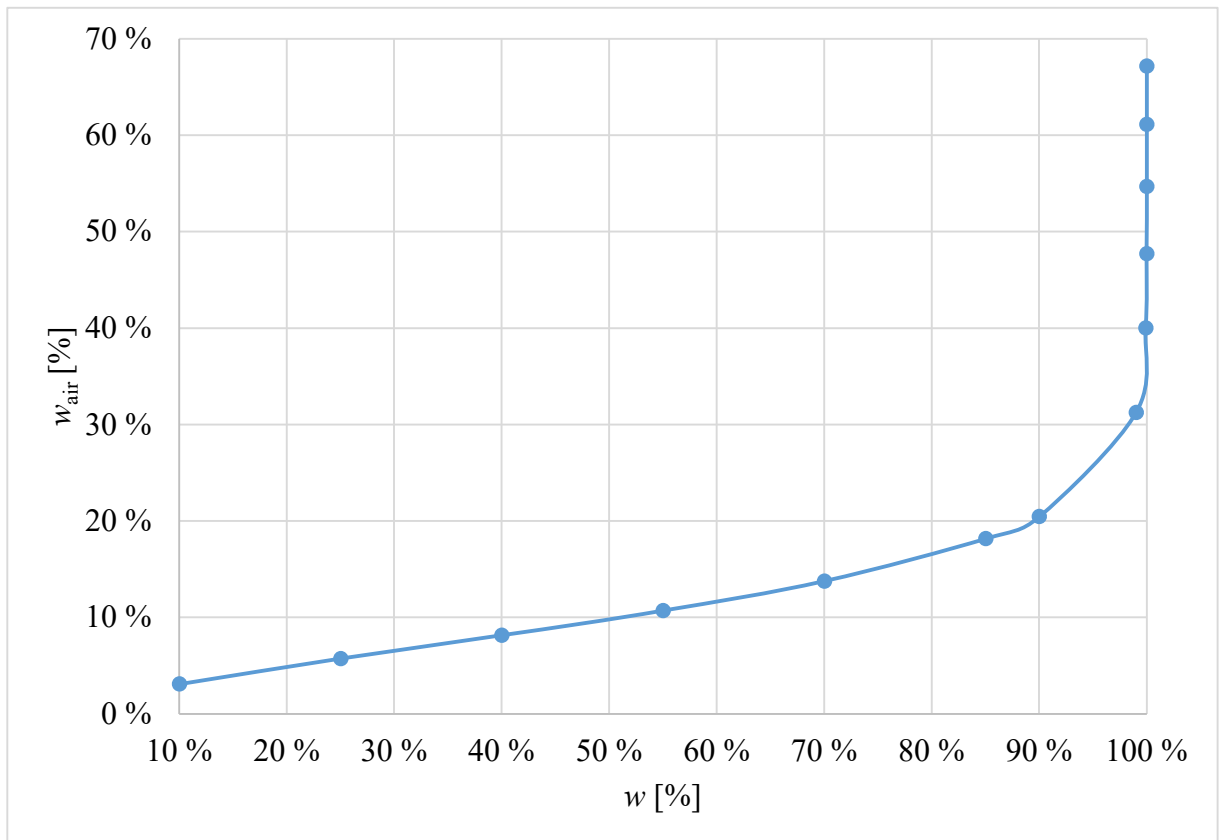


Obr. 17: Grafický průběh vlhkosti  $w_{air} = 70\%$  pro rozdílné teploty.

V (Tab. 2) a na (Obr. 18) 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  $0\text{ °C}$ . 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.

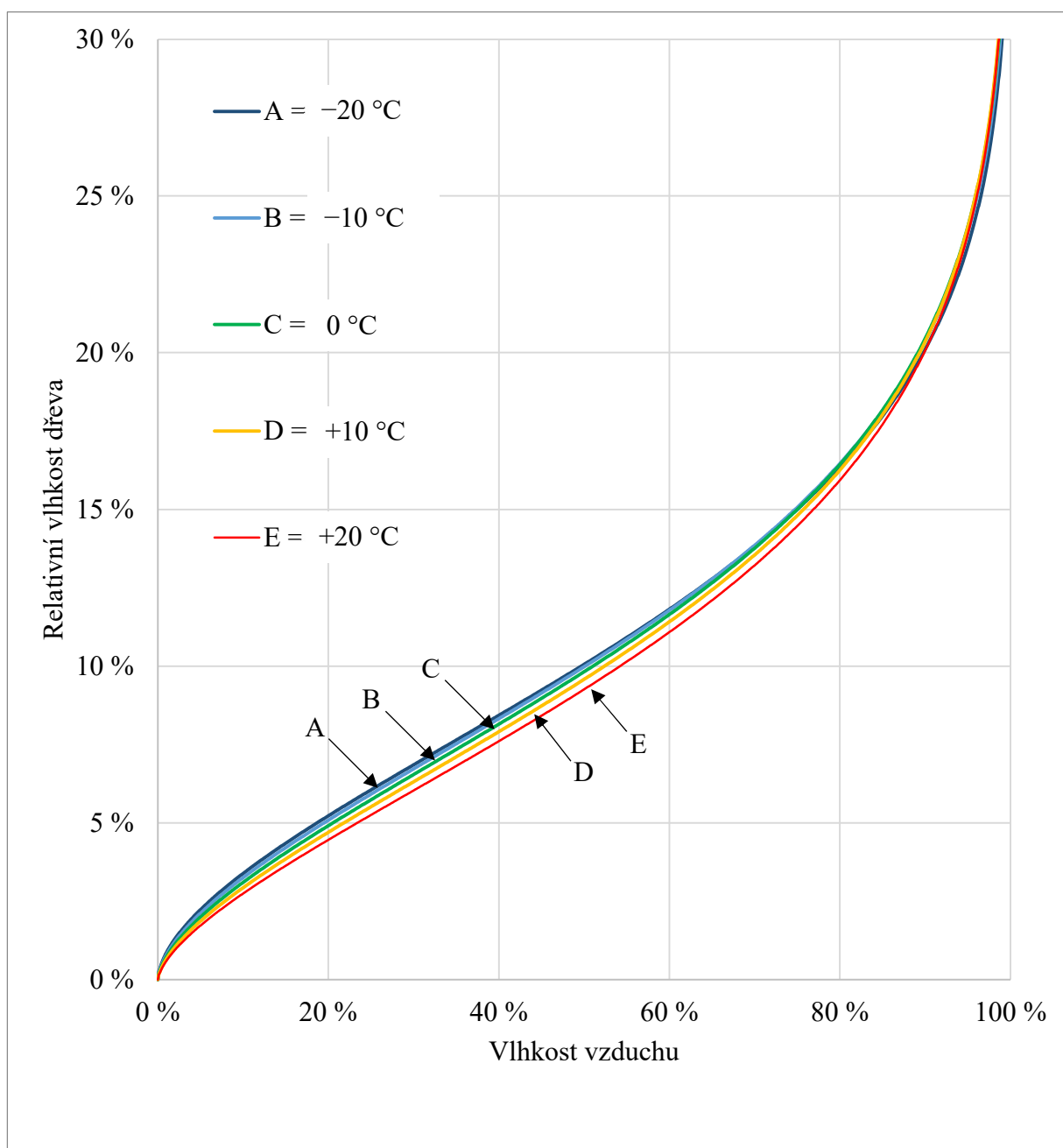
Tab. 2: Stejná teplota  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a různé vlhkosti  $w_{air}$ .

$T$ [K]	$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$w$ [%]	$w_{air}$ [%]
273,15	0	25	5,743
		40	8,156
		55	10,715
		70	13,769
		85	18,177
		90	20,460
		99	31,245
		99,9	40,026
		99,99	47,715
		99,999	54,683
		99,9999	61,125
		99,99999	67,160



Obr. 18: Grafický průběh  $w_{air}$  pro  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sorpční izoterma pro rovnovážnou vlhkost byla stanovena dle vztahu (5) a je zobrazená na (Obr. 19). Pro snadnější orientaci v obrázku byly zvolené různé barvy zobrazující rozdílné teploty. Červenou barvou je naznačena sorpční izoterma s nejvyšší teplotou +20 °C, barevná škála se postupně s klesající teplotou mění až na tmavě modrou, která zobrazuje sorpční izotermu s teplotou -20 °C. Z (Obr. 19) je velice dobře patrná závislost teploty vzduchu a rychlosti navlhání dřeva. Čím je teplota vzduchu vyšší, tím pomaleji dřevo vlhkost přijímá. Tento jev je dobře vidět na (Obr. 19) na červené křivce s označením E, která zobrazuje průběh rovnovážné vlhkosti  $w_{air}$  pro +20 °C.



Obr. 19: Sorpční izoterma bez hystereze.

### B.4.1 Sorpční křivka s hysterezí

Pro nejpřesnější numerické výpočty je důležité použít sorpční křivku, která je matematicky definována a obsahuje hysterézi. Je tedy definována oběma větvemi křivky a má sorpční i desorpční část. Tato křivka více odpovídá reálnému chování dřeva a dodá přesnější výsledky chování dřeva. Pro tento případ lze např. použít Hailwood – Harrobinova izotermu [43]. Tato izoterma je definována pomocí vztahu (6), který je převzat z [43]

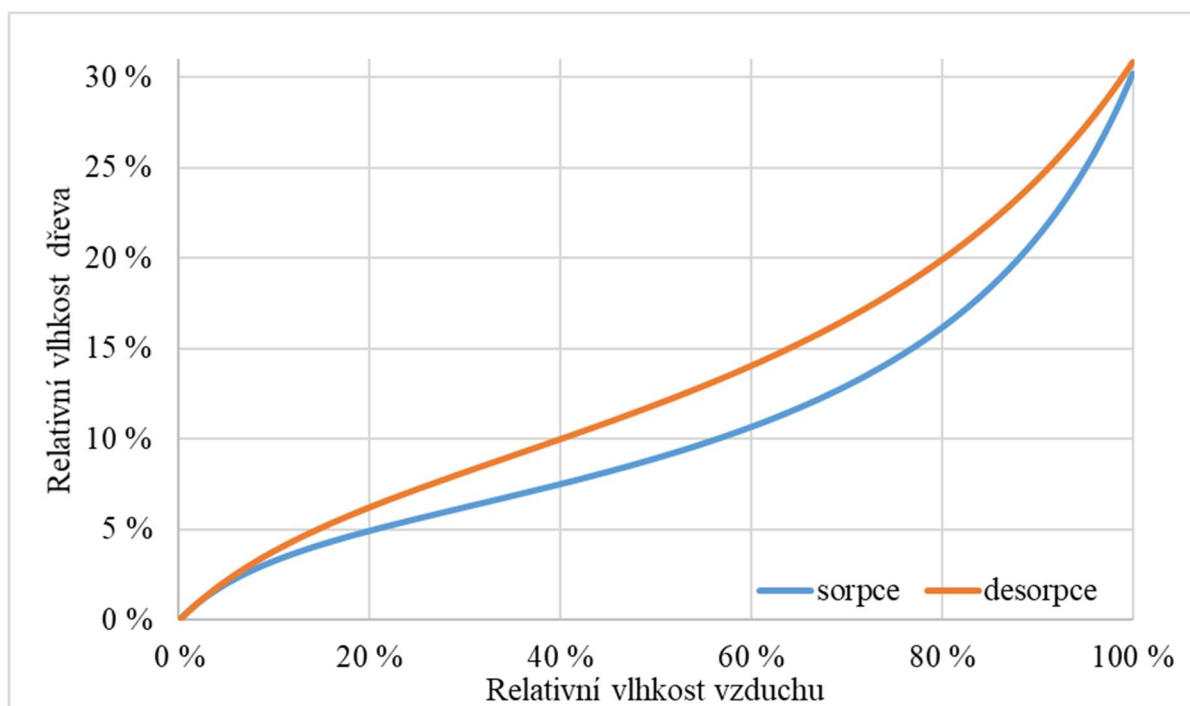
$$w_{bl} = \frac{w}{f_1 + f_2 w + f_3 w^2}, \quad (6)$$

kde  $w$  je relativní vlhkost vzduchu a  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_3$  koeficienty udávající tvar křivek. Hodnoty koeficientů  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_3$  [45] pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) jsou uvedeny v (Tab. 3).

Tab. 3: Hailwood – Harrobinova izoterma, parametry tvaru křivky [45].

	$f_1$ [-]	$f_2$ [-]	$f_3$ [-]
adsorpce	1,804	13,63	-12,12
desorpce	1,886	7,884	-6,526

Pro představu tvaru Hailwood – Harrobinova izotermu je na (Obr. 20) průběh této izotermu naznačen, modrá křivka představuje sorpční část a oranžová křivka znázorňuje desorpční část izotermu.



Obr. 20: Hailwood – Harrobinova izoterma s hysterezí.

## B.5 Voda ve struktuře dřeva

Hlavní součástí všech živých buněk je voda. Voda se ve struktuře dřeva rozlišuje podle toho, kde se vyskytuje. Podle [34], [70] a [100] je možné vodu rozdělit na vodu volnou, vázanou a vodu chemicky vázanou. Schématické znázornění vody ve struktuře dřeva je naznačeno na (Obr. 21).

Voda volná se vyskytuje uvnitř dutin buněk a v mezibuněčných prostorech. Při růstu stromu zajišťuje transport vody a živin. Po pokácení stromu se voda volná ze dřeva jako první vypařuje. V případě odparu této vody se dřevo objemově nemění. Mění se jen jeho objemová hmotnost  $\rho$ .

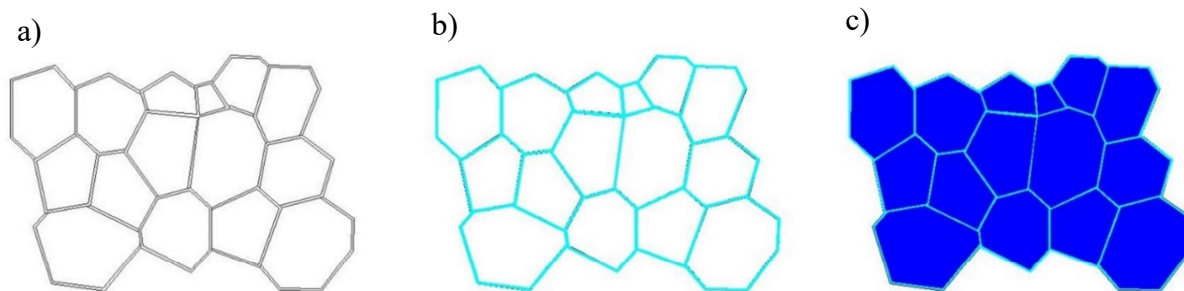
Voda vázaná, která se do dřeva dostala pohlcením vlhkosti z prostředí, vyplňuje mikroskopické dutinky v buněčných stěnách. Přijímáním této vody dřevo navlhá a v opačném případě dřevo vysychá. Uvedený stav způsobuje jak objemové změny tak i změny v objemové hmotnosti.

Voda chemicky vázaná je součástí chemického složení dřeva. Je obsažena i v suchém dřevě a její uvolnění je možné jen při chemickém zpracování dřeva pomocí suché destilace [34] nebo pomocí spálení [58]. Její celkové množství obsahuje 1 % – 2 % sušiny dřeva [58].

Pokud je voda vázaná na své maximální hranici a voda volná se ve struktuře dřeva vůbec nevyskytuje, tak lze tento stav podle [34] a [100] definovat jako bod nasycení vláken (*BNV*). Tento bod jiné zdroje např. [58] označují termínem mez nasycení buněčných stěn (*MNBS*). *BNV* je velice důležitá hranice, protože nad tímto bodem se dřevo podle [34] a [100] objemově nemění. Tento rozdíl je dobře patrný a je schématicky zobrazen na (Obr. 21). 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 [34]. Přesnou hodnotu hranice *BNV* lze stanovit ze vztahu (7) [122], kde  $M_{BNV}$  je relativní vlhkost dřeva, která se rovná *BNV* a  $T$  je teplota. Při teplotě 293,15 K, která odpovídá 20 °C je  $M_{BNV} = 28$  %. Ve zdroji [34] lze nalézt hodnotou pro  $M_{BNV} = 30$  %. Dle [58] se *BNV* u našich dřevin pohybuje v rozmezí 22 % – 35 %, které závisí na druhu dřeviny a je ovlivněna např. hustotou, chemickou stavbou apod. Závislost bodu nasycení vláken a hustoty dřeva lze stanovit dle vztahu (10) [58], kde  $\rho_k$  je konvenční hustota dřeva,  $\rho_0$  hustota absolutně suchého dřeva a  $\rho_{H_2O}$  je hustota vody.

$$M_{BNV} = 0,57315 - 0,001T \quad (7)$$

$$BNV = \left( \frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_0} \right) \rho_{H_2O} \quad (8)$$



Obr. 21: Schématické znázornění obsahu vody ve struktuře vody a) pouze chemicky vázaná voda, b) voda vázaná a c) voda vázaná i volná.

Rychlost vysychání dřeva ovlivňuje několik fyzikálních vlivů jako např. vlhkost  $w$ , teplota  $T$  nebo objemová hmotnost  $\rho$ . Obecně platí, čím je:

- nižší vlhkost dřeva, tím pomaleji dřevo vysychá,
- vyšší teplota okolí, tím rychleji se voda vypařuje,
- vyšší hustota dřeva, tím pomaleji se voda ze dřeva vypařuje [14].

Vlhkost dřeva  $w$  lze vypočítat pomocí vztahu (9) podle [24], [26], [30] a [70] kde  $m_1$  je hmotnost zkušebního tělesa před vysušením v gramech,  $m_0$  je hmotnost vysušeného zkušebního tělesa v gramech. Výsledná vlhkost  $w$  je určena v procentech. Ze vztahu (9) lze určit absolutní vlhkost dřeva  $w_{abs}$ . Relativní vlhkost dřeva  $w_{rel}$  se učí dle vztahu (10) [58], kde  $m_1$  je hmotnost vlhkého dřeva,  $m_0$  hmotnost absolutně suchého dřeva. Absolutní a relativní vlhkost lze navzájem přepočítat za použití vztahů (11) a (12) [58].

$$w_{abs} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (9)$$

$$w_{rel} = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot 100 \quad (10)$$

$$w_{rel} = \frac{100 \cdot w_{abs}}{100 + w_{abs}} \quad (11)$$

$$w_{abs} = \frac{100 \cdot w_{rel}}{100 - w_{rel}} \quad (12)$$

Podle [68] se vlivem zvyšujícího se obsahu vody ve struktuře dřeva se snižují mechanické a elastické vlastnosti dřeva. Uvedené změny jsou blíže popsány v [68], 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. 4)

Tab. 4: Změny vybraných vlastností u dřeva vlivem vlhkosti. Převzato z [68].

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. 4) znamená zkoušení ve směru podélném ( $L$ ) a index  $\perp$  označuje zkoušení ve směru radiálním ( $R$ ) a tangenciálním ( $T$ ).

Modul pružnosti v ohybu (MOE). Zkratka MOE vychází z anglického označení modulus of elasticity. MOE je dle [74] definován jako vlastnost, která popisuje tuhost materiálu. Čím je hodnota MOE vyšší, tím je dřevo odolnější proti deformaci.

Pevnost v ohybu (MOR) vychází z anglického označení modulus of rapture.

### B.5.1 Nasákavost dřeva

Nasákavost dřeva lze charakterizovat jako schopnost dřeva přijímat vodu ve formě kapaliny v důsledku pórovité skladby dřeva. Dřevo je maximálně nasáklé vodou, je-li plně nasyceno vázanou vodou a obsahuje-li maximální množství vody volné. Množství vody je závislé především na množství pórů ve dřevě, které je nepřímo úměrné hustotě dřeva. Maximální nasákavost  $w_{max}$  lze stanovit dle vztahu (13) [58], kde  $\rho_s$  je hustota dřevní substance a  $\rho_k$  je konvenční hustota dřeva

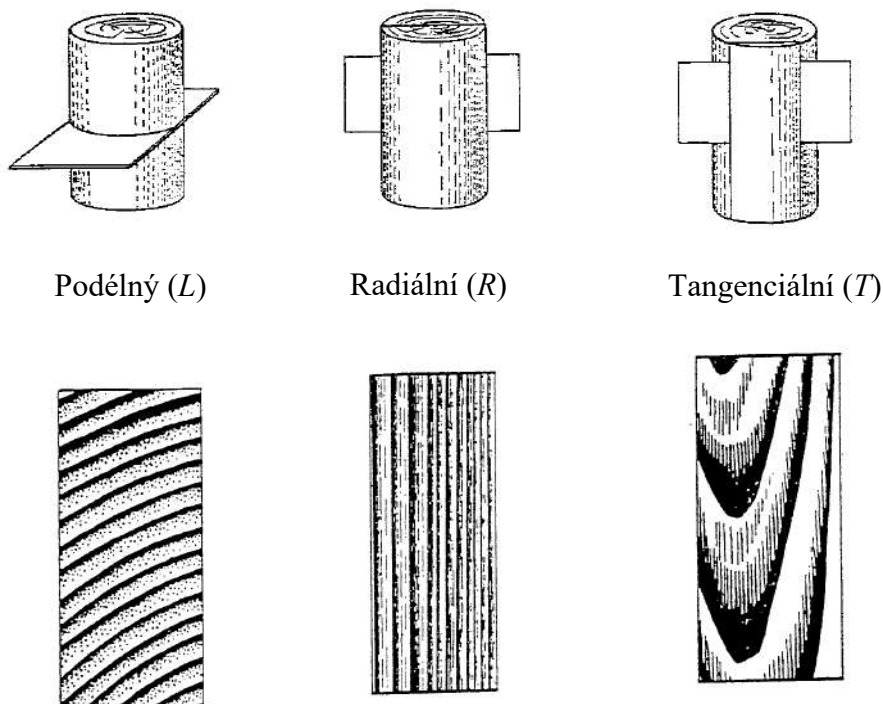
$$w_{max} = \left( \frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (13)$$

Nasákavost jádra a běli je rozdílná. Běl má vždy vyšší obsah vody. Maximální vypočtená vlhkost borového dřeva je u běli 206 % a jádra 180 % [58].

Vlhkost dřeva živého stromu se mění v závislosti na druhu dřeviny, její hustotě, výšce stromu, stáří stromu a také na ročním období. V zimě stromy dosahují maximálních vlhkostí, naopak tomu je v létě [58]. U listnatých stromů je vlhkost dřeva po průměru kmene i výšce stromu rovnoměrnější než u jehličnatých stromů, kde má jádro 3 až 4 krát menší vlhkost než běl. Borovice a smrk mají průměrnou roční vlhkost jádra 33 – 38 % a vlhkost běle je 112 – 132 % [58].

## B.6 Anizotropie

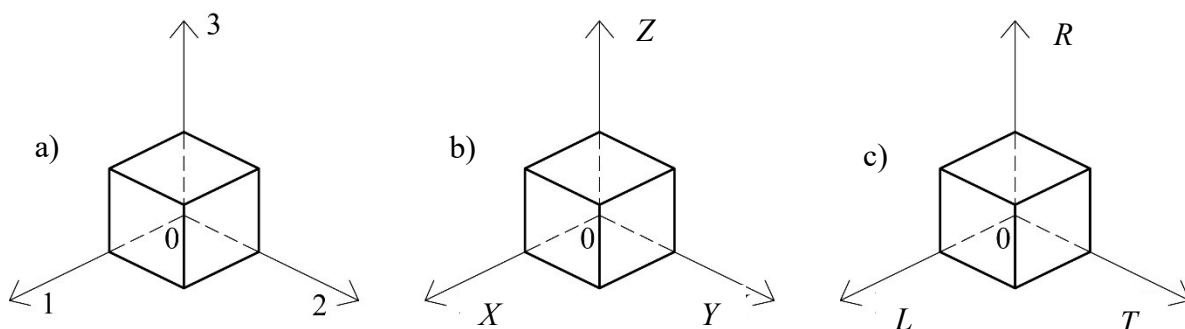
Dřevo je dle [13], [56] anizotropní materiál. Tato vlastnost způsobuje, že se materiál chová velice odlišně v různých směrech [9], což je dáno nestejnou strukturou [34] a stavbou dřeva [55]. Ve dřevu lze obecně definovat tři směry, které jsou závislé na orientaci vláken. Jedná se o podle [100] směry podélný ( $L$ ), radiální ( $R$ ) a tangenciální ( $T$ ), jak je patrné z (Obr. 22).



Obr. 22: Základní řezy dřevem. Převzato a upraveno z [34].

Anizotropie dřeva ovlivňuje veškeré vlastnosti, tj. od mechanických vlastností [100] přes akustické vlastnosti [13] až po bobtnání a sesychání [7]. Z těchto důvodů je potřebné zavést souřadné systémy, kterými lze zobecnit strukturu dřeva a tím provádět zjednodušené výpočty. Obecná pravoúhlá soustava souřadnic 123 zobrazená na (Obr. 23 a) je pro potřeby výpočtů materiálových modelů zobecněna, jak je uvedeno na (Obr. 23 b) a (Obr. 23 c), kde (Obr. 23 c) odpovídá přírodním směrům, které se používají u dřeva, jak je zobrazeno na (Obr. 22).

Jak je z (Obr. 23) patrné, tak pro jednotlivé osy souřadných systémů platí vztah (14).

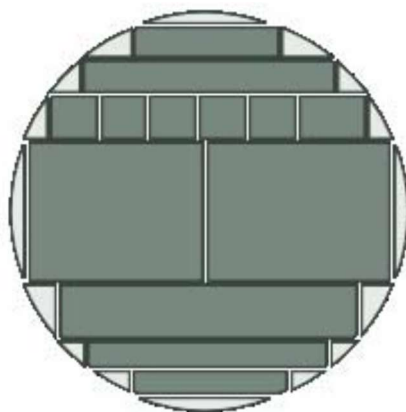


Obr. 23: Obecná pravoúhlá soustava souřadnic 123 (a) a pravoúhlá soustava souřadnic XYZ (b) a LTR (c). Převzato a upraveno z [95].

$$1 \equiv X \equiv L, 2 \equiv Y \equiv T, 3 \equiv Z \equiv R, \quad (14)$$

Chování dřevěných prvků při namáhání je ovlivněno i tím, jak se z kmene vytvoří jednotlivé dřevěné prvky. Závisí na jejich orientaci a rozdílné vzdálenosti od středu (jádra). Možný případ rozřezání kmene je zobrazený na (Obr. 24) [93].

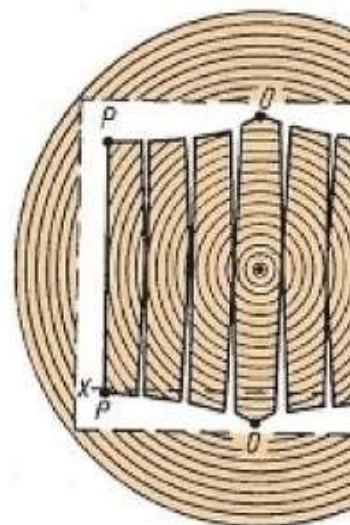
Na (Obr. 24) a (Obr. 26) je zobrazeno, jak se dřevo chová při vysoušení v případě, vytvoření řezů dle označení. Jedná se o smršťování v důsledku ztráty vody ze struktury dřeva [34]. Dřevo odevzdává vodu při vysychání v každém z přirozených směrů s jinou intenzitou [100], to způsobuje deformace dřeva, které jsou vidět na (Obr. 26) a (Obr. 25).



Obr. 24: Možnosti nařezání dřeva. Převzato z [93].



Obr. 26: Deformace dřeva při vysoušení v různých částech klády. Převzato z [33].



Obr. 25: Deformace střední části kmene při rozřezání na prkna. Převzato a upraveno z [46].

Pro matematické modelování je vytvořeno několik materiálových modelů, které mají různá zjednodušení. Nejčastěji se používají tyto modely:

- lineárně pružný model,
- izotropní materiálový model,
- ortotropní materiálový model,
- anizotropní materiálový model.

Nejvíce zjednodušený model je lineárně pružný materiálový model. Model nejvíce odpovídající reálným vlastnostem dřeva je anizotropní materiálový model. Pro numerické výpočty v této práci byl použit ortotropní materiálový model, protože je přesnější než lineární materiálový model i izotropní materiálový model a jsou zde popsány směry radiální ( $R$ ) a tangenciální ( $T$ ).

### B.6.1 Lineárně pružný materiál

Jak uvádí zdroj [10] je lineárně pružný materiál charakterizován hustotou deformační energie  $W(\boldsymbol{\varepsilon})$ , kterou lze obecně při zanedbání vektoru počáteční deformace  $\boldsymbol{\varepsilon}_0$  zapsat dle vztahu (15) [15] a [77].

$$W(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}) , \quad (15)$$

kde  $\mathbf{C}$  je matice tuhosti materiálu a  $\boldsymbol{\varepsilon}$  je vektor deformace, který má v obecné pravoúhlé soustavě souřadnic 123 (Obr. 23 a) obecně 6 složek zapsaných ve tvaru (16) podle [95]

$$(\boldsymbol{\varepsilon}) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{12})^T . \quad (16)$$

Hustota komplementární energie  $W^*$  ( $\sigma$ ) lineárně pružného materiálu je vyjádřena podle [10] při zanedbání vektoru počáteční deformace  $\epsilon_0$  vztahem (17).

$$W^*(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma^T \mathbf{S} \sigma), \quad (17)$$

kde  $\mathbf{S}$  je matice poddajnosti materiálu a  $\sigma$  je vektor napětí o 6 složkách, který má v obecné pravoúhlé soustavě souřadnic 123 (Obr. 23 a) tvar (18).

$$(\sigma) = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12})^T. \quad (18)$$

Mezi maticí tuhosti materiálu  $\mathbf{C}$  a maticí poddajnosti materiálu  $\mathbf{S}$  existuje podle [8] a [10] inverzní vztah, který lze zapsat ve tvaru (19).

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}^{-1} \quad \text{a} \quad \mathbf{S} = \mathbf{C}^{-1}. \quad (19)$$

Mezi hustotou deformační energie  $W$  ( $\epsilon$ ), hustotou komplementární energie  $W^*$  ( $\sigma$ ), vektorem napětí  $\sigma$  a vektorem deformace  $\epsilon$  existuje závislost, kterou lze zapsat ve tvaru (20). Současně mezi nimi podle [10] existují vztahy (21) a (22).

$$W(\epsilon) + W^*(\sigma) = \sigma^T \epsilon \quad (20)$$

$$(\sigma) = \frac{\partial W(\epsilon)}{\partial (\epsilon)} \quad (21)$$

$$(\epsilon) = \frac{\partial W^*(\sigma)}{\partial (\sigma)} \quad (22)$$

Vztahy (23) a (24) představují maticový zápis fyzikálních rovnic (21) a (22), které vyjadřují závislost mezi vektorem napětí  $\sigma$  a vektorem deformace  $\epsilon$ . Vztah (23) představuje podle [15] zobecněný Hookův zákon a vztah (24) inverzní tvar Hookova zákona.

$$(\sigma) = \mathbf{C} \epsilon \quad (23)$$

$$(\epsilon) = \mathbf{C}^{-1} \sigma = \mathbf{S} \sigma \quad (24)$$

Pro potřeby modelování chování dřeva lze použít různé přístupy modelování. Existuje více modelů a každý se liší svojí oblastí použití, která je ovlivněná přesností modelu. Tato přesnost je úměrná počtu materiálových konstant použitých pro model.

### B.6.2 Izotropní materiálový model

Izotropní materiálový model předpokládá stejné mechanické chování materiálu ve všech směrech souřadnicových os. Zdroj [107] definuje izotropní materiál pomocí tří elastických konstant: Yongův modul pružnosti  $E$ , modul pružnosti ve smyku  $G$  a Poissonovým součinitelem příčné deformace  $\nu$ . Pro konstanty dle [58] a [95] musí platit  $E > 0$ ,  $G > 0$  a  $-1 < \nu < 0,5$ .

Matrice tuhosti materiálu  $\mathbf{C}$  je čtvercová a symetrická podle hlavní diagonály. Zobecněný tvar Hookova zákona (23) v případě izotropního materiálu modelu lze zapsat v rozepsaném maticovém zápisu ve tvaru (25).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Matrice poddajnosti materiálu  $\mathbf{S}$  je rovněž čtvercová a symetrická podle hlavní diagonály. Za použití inverzního tvaru Hookova zákona (24) je rozepsaný maticový zápis ve tvaru (26).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}, \quad \frac{1}{2G} = \frac{1+\nu}{E} \quad (26)$$

Z matice (26) vyplývá, že elastické konstanty  $E$ ,  $G$  a  $\nu$  jsou vzájemně závislé a platí mezi nimi vztah (27).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (27)$$

### B.6.3 Ortotropní materiálový model

Ortotropní materiál je definován třemi vzájemně kolmými rovinami. Mechanické chování materiálu je v ortotropních směrech různé na rozdíl od izotropního materiálového modelu. Ortotropní materiálový model se podle [10] a [71] redukuje na devět nezávislých elastických konstant. Tyto konstanty jsou: Yongův modul pružnosti ve směru materiálové osy 1 ( $E_1$ ), 2 ( $E_2$ ) a 3 ( $E_3$ ), modulem pružnosti ve smyku v rovinách 12 ( $G_{12}$ ), 23 ( $G_{23}$ ) a 13 ( $G_{13}$ ) a Poissonovy součinitele v rovinách 12 ( $\nu_{12}$ ), 23 ( $\nu_{23}$ ) a 13 ( $\nu_{13}$ ). Zbývající Poissonovy součinitele v rovinách 12 ( $\nu_{21}$ ), 23 ( $\nu_{32}$ ) a 13 ( $\nu_{31}$ ) se určí ze vztahu (28).

$$\frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{33}}{E_3}, \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1}, \quad \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad \nu_{12}\nu_{23}\nu_{31} = \nu_{21}\nu_{32}\nu_{13} \quad (28)$$

Zobecněný Hookův zákon (23) ortotropního materiálového modelu je vyjádřen maticí (29). Inverzní tvar Hookova zákona (24) pro ortotropní materiál za užití matice tuhosti  $\mathbf{S}$  je zapsán v matici (30) [71], v případě rozepsání matice je její tvar (31) [71].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad \frac{1}{2G} = \frac{1+\nu}{E} \quad (31)$$

Jak je uvedeno v [15], tak musí být moduly pružnosti  $E_i$  (pro  $i = 1, 2, 3$ ) a moduly pružnosti ve smyku  $G_{kl}$  (pro  $kl = 12, 23, 13$ ) kladné, což je definováno vztahem (32) a současně musí být splněny podmínky (33) a (34).

$$E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{13}, G_{12} > 0 \quad (32)$$

$$(1 - \nu_{12}\nu_{21}) > 0, \quad (1 - \nu_{13}\nu_{31}) > 0, \quad (1 - \nu_{23}\nu_{32}) > 0 \quad (33)$$

$$(1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{31}) > 0 \quad (34)$$

## B.6.4 Anizotropní materiál

V případě definice dřeva jako anizotropní materiál je uvažováno s nezávislými elastickými konstantami, které jsou popsány Hookovým zákonem a jsou tvořeny maticí (35) [71]. V tomto případě se jedná o matici poddajnosti materiálu  $S$ , která je symetrická a v případě obecného anizotropního materiálu obsahují celkem 21 nezávislých materiálových konstant [95].

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & sym & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (35)$$

## B.7 Metody měření vlhkosti ve dřevě

Pro zjištění obsahu vody ve struktuře dřeva lze použít velké množství metod s rozdílnými přesnostmi a různými požadavky na vybavení. Metody je možné rozdělit na:

- metody přímé,
- metody nepřímé.

### B.7.1 Přímé metody

U přímých metod je přímým způsobem zjištěn skutečný obsah vody ve dřevě. Příkladem přímé metody je metoda gravimetrická, která se také někdy nazývá metoda váhová. Dalším příkladem metody přímé je metoda destilační neboli metoda karbidu vápníku ( $\text{CaC}_2$ ) [6] a [98].

#### B.7.1.1 Gravimetrická (váhová) metoda

Gravimetrická metoda patří mezi nejrozšířenější [6] a nejčastěji používané metody [98], kterou lze zařadit mezi destruktivní metody [6] a [98] pro stanovení vlhkosti v zabudované konstrukci. Pro zjištění vlhkosti je potřeba vzorek konstrukce odebrat. Při odběru vzorku se nedoporučuje místo odvrtávat např. vykružovacími vrtáky do dřeva. Důvodem je možné zahřívání konstrukce, při kterém by docházelo k vysoušení vzorku [6], a tím i k jeho znehodnocení nebo ovlivnění výsledků [59]. Jedná se o normovou metodu a je tedy popsán přesný způsob, jak tuto metodu provádět. Popis měření je uvedený v ČSN EN ISO 12570 – Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě [30], ČSN 49 0103 (490103) Dřevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach [18] a v normě ČSN EN 13183-1 (491016) Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou [26], která udává přesná specifika za jakých podmínek se dřevo vysouší. Existují

specializované normy na určité konstrukce jako je ČSN 74 4505 (744505) [24], která popisuje jak postupovat při stanovení vlhkosti v podlahové konstrukci.

Výhodou gravimetrické metody je vysoká přesnost a nenáročné podmínky na laboratorní vybavení [6] a [70]. Pro použití gravimetrické metody se využívá analytická váha s požadovanou přesností a sušárna. Díky vysoké přesnosti gravimetrické metody se používá jako referenční metoda při posuzování přesnosti ostatních metod [58] a [129].

Další nevýhodou gravimetrické metody kromě nutnosti odebrání vzorku z konstrukce je časová náročnost gravimetrické metody na stanovení vlhkosti vzorku. Touto metodou nelze měřit nad 95 % vlhkosti dřeva, jak udává [70]. Tato hranice je z důvodů rostoucí nepřesnosti nad tímto bodem. Přesnost gravimetrické metody je dle [98]  $\pm 3$  %.

Normy ČSN 49 0103 [18] a ČSN EN 13183-1 [26] udávají, že dřevěné vzorky se suší v sušárně při  $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do doby, kdy dvě po sobě jdoucí měření od sebe vzdálené o časový interval 2 hodin se nezmění více jak o 0,02 g nebo 0,1 %. Po splnění této podmínky lze zvážením zjistit hodnotu hmotnosti suchého vzorku  $m_0$ . Norma ČSN EN 13183-1 [26] udává i požadavek přesnosti na váhy vztahené k hmotnosti vysoušeného vzorku. Pro vzorek do 100 g je vyžadována přesnost 0,01 g a pro vzorek těžší než 100 g je požadovaná přesnost stanovena na 0,1 g. Relativní vlhkost lze pak stanovit ze vztahu (9).

#### B.7.1.2 Destilační metoda (metoda $\text{CaC}_2$ )

Výhodou je, že se dá provádět přímo in-situ. Stanovení vlhkosti začíná odběrem vzorku jako u gravimetrické metody. U této metody je potřeba odebrat větší množství vzorku, aby bylo měření co nejpřesnější [6]. Následně se vzorek rozmělní v hmoždíři [59] a přidá se uhličitán vápenatý  $\text{CaC}_2$ , který spustí chemickou reakci s vodou. Proces lze popsat chemickou rovnicí (36). Přesnost se udává dle [98]  $\pm 3$  %.



#### B.7.2 Nepřímé metody

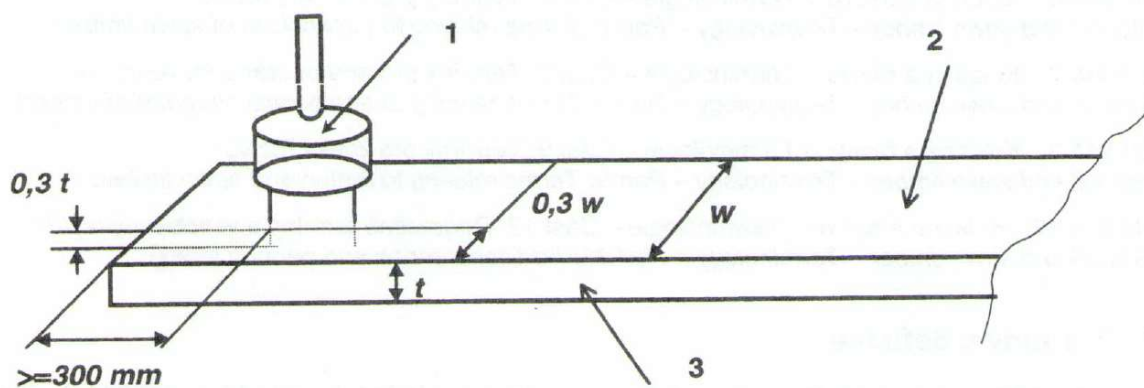
Pomocí nepřímých metod se určuje obsah vody nepřímo, například měřením jiné veličiny jejíž hodnota závisí na obsahu vody v konstrukci. Z nepřímých metod jsou podle [119] rozšířené metody:

- elektrofyzikální (odporová, dielektrická),
- radiometrické (založené na absorpci různých druhů záření),
- akustické (využití rychlosti šíření nebo adsorpce zvuku a ultrazvuku),
- termofyzikální.

## B.7.2.1 Odporová metoda

Odporová metoda je založena na principu vedení elektrického odporu pórovitou látkou známé délky, přičemž se měří velikost odporu [78]. Z fyzikálního hlediska platí, že se zvyšující se vlhkostí se vodivost zvyšuje. Naopak suchá pórovitá látka se chová jako nevodič [78]. Na tomto principu jsou založené zapichovací [98] nebo hrotové vlhkoměry [88]. K měření je potřeba znát druh dřeviny, protože přístroje jsou kalibrovány právě podle nich. Z tohoto důvodu je potřeba před začátkem měření správně nastavit křivku, která bude odpovídat měřenému vzorku. Při měření se hroty vlhkoměru zarazí do vzorku [98]. Měření probíhá mezi hroty a je potřeba, aby došlo k jejich průniku do měřeného vzorku a neměřila se pouze vlhkost na povrchu vzorku [59]. Hroty mohou být součástí přímo přístroje [98] nebo jsou na samostatné sondě, která se k přístroji připojí [88]. Měřicí rozsah zařízení je od 5 % do 90 % relativní vlhkosti dřeva a přesnost měření je závislá na pořizovací ceně výrobku jak je uvedeno ve zdroji [88]. Z měření a literatury lze vyslovit závěr, že gravimetrická metoda lze použít pro orientační stanovení vlhkosti. Tuto metodu lze použít pouze jako orientační, a to z důvodu, že výsledná hodnota se vztahuje pouze na lokální vlhkost vzorku a ne vlhkost jako celku.

Odporová metoda však patří také mezi normové metody. Norma ČSN EN 13183-2: Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou [27] popisuje, že tuto metodu lze použít pro dřevo o vlhkosti přibližně mezi 7 % a 30 %. Dále norma ČSN EN 13183-2 [27] určuje přesnou polohu měření a uvádí že je minimálně 300 mm od kraje vzorku nebo uprostřed v případě vzorku menšího než 600 mm. Poloha měření je zobrazena na (Obr. 27). Jak je v názvu normy uvedeno, tak se jedná o odhad vlhkosti a tedy tuto možnost nelze použít pro přesné měření vlhkosti ve dřevě.



Obr. 27: Pozice pro měření vlhkosti vpichovým vlhkoměrem. 1 – zarážecí elektroda, 2 – plocha, 3 – bok,  $t$  – tloušťka vzorku,  $w$  – šířka měřeného vzorku. Převzato a doplněno ČSN EN 13183-2 [27].

### B.7.2.2 Kapacitní metoda

U kapacitní metody se měří dielektrická konstanta hmoty, která je závislá na obsahu vody v její struktuře. Citlivost metody se posuzuje podle relativní permitivity  $\epsilon$ . Dřevo má relativní permitivitu menší než 10, zatím co relativní permitivita vody je přibližně 82, jak udává zdroj [6]. Přístroj využívající tuto metodu neobsahuje žádné hroty, jen se přikládá na povrch měřeného materiálu [88].

### B.7.2.3 Radiometrická metoda

Radiometrická metoda je založená na průniku rychlých neutronů do materiálů, kde jsou moderovány a detektory tyto změny zaznamenávají. Metoda má tři základní soupravy, které se liší hloubkou sondy a tím i možnostmi jejího měření jako kulové nebo polokulové geometrii. Radiometrické soupravy jsou podle [6]:

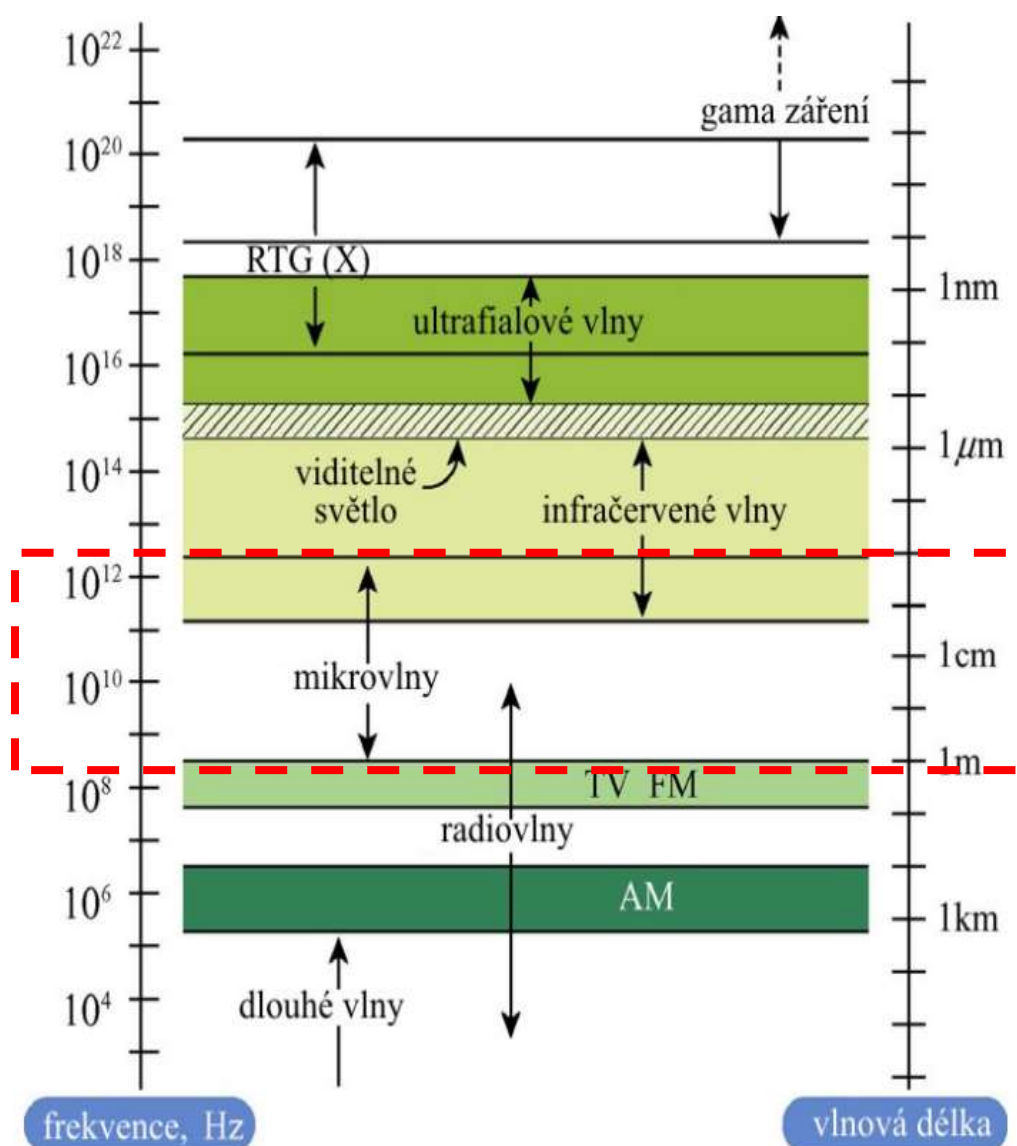
- hloubková,
- povrchová,
- kombinovaná.

Vlhkost ze dřeva lze odstranit různými technickými metodami, které se liší svojí účinností, metodou vysoušení a místem, kde ji lze provést. Běžná sušárna, která se používá na vysoušení velkých prvků např. na pilách se používá na vysoušení čerstvého dřeva na požadovanou vlhkost 10 – 12 %. Tato metoda by se nedala použít například při rekonstrukci, kde se při stavebně technickém průzkumu zjistí zvlhne zhlaví trámu. Tento trám nelze demontovat, a tak musí být vysušen na místě. K tomuto vysoušení lze například použít elektromagnetického mikrovlného záření.

## B.8 Elektromagnetické mikrovlnné záření (EMW)

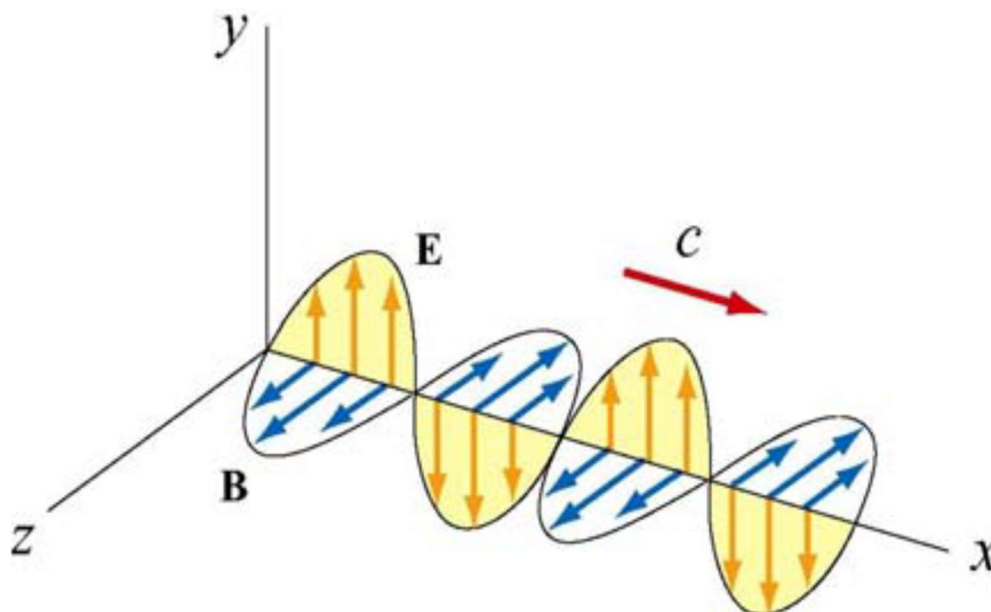
Elektromagnetické mikrovlnné záření (EMW) jsou elektromagnetické vlny zaujímající v elektromagnetickém spektru oblast mezi infračerveným zářením s frekvencí do 300 MHz a radiovými vlnami, které začínají frekvencí od 1000 MHz. Což odpovídá vlnovým délkám 1 mm až 1 m [48] a [81]. Toto základní dělení je patrné z (Obr. 28).

EMW vznikají přeměnou elektrické energie na mikrovlnnou energii v generátoru, který je tvořen vysokonapěťovými elektronkami. Nejběžněji používanými zdroji jsou magnetrony nebo klystrony [12] a [108].



Obr. 28: Vlnové spektrum. Převzato z [81].

Elektromagnetická vlna je tvořena na sebe kolnými vlnami elektrické **E** a magnetické **B** složky, jak je znázorněno na (Obr. 29).



Obr. 29: Elektromagnetická vlna – elektrická **E** a magnetická složka **B** vlnění. Převzato z [81].

Pro průmyslové použití byla stanovena frekvence 2450 MHz, která byla zvolena, aby nedocházelo k interferencím s telekomunikačními frekvencemi [108]. Této frekvenci odpovídá vlnová délka 122 mm [83], [84] a [89]. Výpočet vlnové délky lze stanovit ze vztahu (37) uvedeného v [108], kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $c_\lambda$  rychlost šíření vlny a  $f$  frekvence mikrovlnného záření.

$$\lambda = \frac{c_\lambda}{f} \quad (37)$$

K výpočtu rychlosti elektromagnetické vlny  $c_\lambda$  je možné použít vztah (38) uvedeného v [108]. Rychlost elektromagnetické vlny  $c_\lambda$  ve vakuu lze získat dosazením permitivity vakua  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}^{-1}$  a permeability vakua  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}^{-1}$  [108] do vztahu (38).

$$c_\lambda = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (38)$$

Rychlost elektromagnetické vlny  $c_\lambda$  v jiném nevodivém homogenním izotropním prostředí lze určit pomocí (39) [108], kde  $\varepsilon_r$  je permitivita prostředí a  $\mu_r$  permeabilita prostředí, pro které se stanovuje rychlost elektromagnetické vlny.

$$c_\lambda = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad (39)$$

Mikrovlnné záření lze popsat pomocí Maxwellových rovnic, které popisují chování elektromagnetického pole. Podle [81] v případě potřeby popisu chování elektromagnetického pole (EMW) pro určitou oblast je nutné použít Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru. Pro případ popisu chování EMW pole v určitém bodě lze použít Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru jak uvádí [81].

U vztahů (40), (41), (42) a (43) platí následující označení  $\mathbf{H}$  je magnetická intenzita,  $j$  označuje hustotu elektrického proudu,  $\epsilon$  permitivita prostředí,  $\mathbf{E}$  elektrická intenzita,  $\mathbf{B}$  magnetická indukce a  $\rho$  hustota elektrického náboje [81] a [106].

Vztah (40) [37] a [48], [79] dokazuje, že vektory magnetické intenzity se točí kolem míst, kudy vede elektrický proud nebo kde se v čase mění elektrická intenzita.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial(\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} \quad (40)$$

Popis vektorů magnetické intenzity je popsán vztahem (41) [37] a [48], [79]. Vektory magnetické intenzity se točí kolem míst, kde se mění magnetická indukce.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial(\mathbf{B})}{\partial t} \quad (41)$$

Vektory elektrické intenzity vystupují z míst, kde je elektrický náboj, jak udává vztah (42) [37] a [48], [79]. Tímto je znám tvar elektrického pole v okolí bodového pole.

$$\operatorname{div}(\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (42)$$

Vztah (43) [37] a [48], [79] udává, že vektory magnetické indukce nikde nevystupují. Siločáry magnetického pole jsou vždy uzavřené a nemohou nikdy vyvěrat z žádného místa.

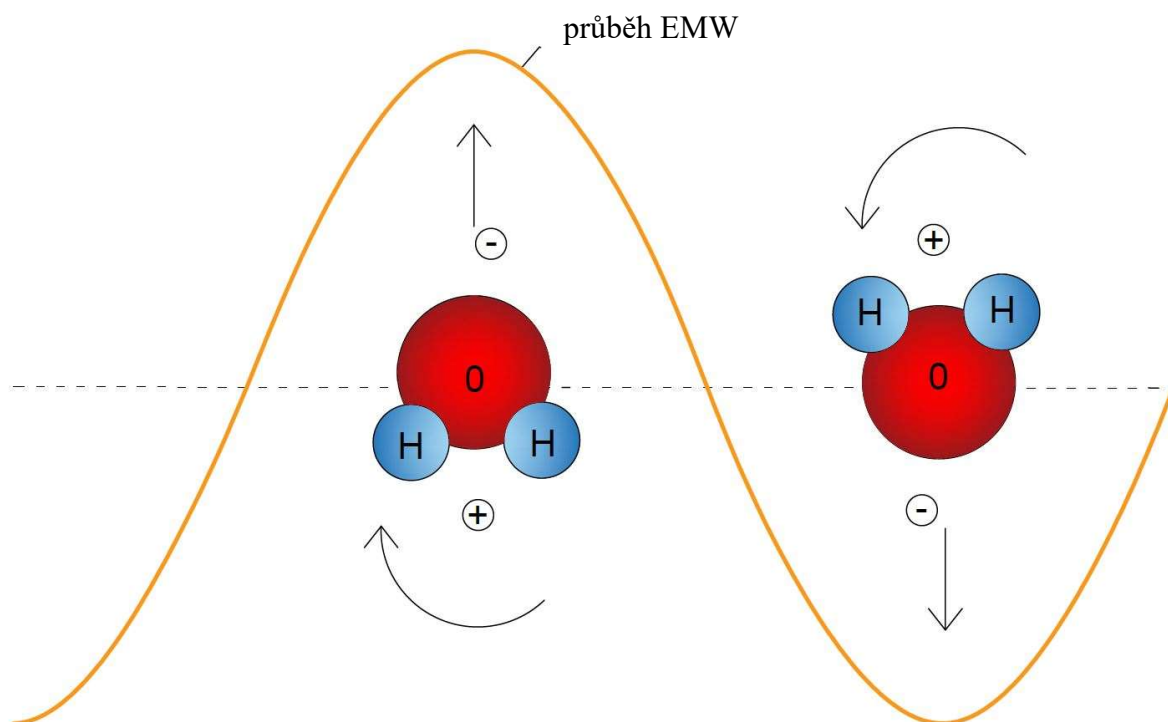
$$\operatorname{div}(\mathbf{B}) = 0 \quad (43)$$

### B.8.1 Vysoušení pomocí EMW

Voda patří mezi polární molekuly a skládá se ze dvou atomů vodíku a jednoho atomu kyslíku. Přičemž kyslík je nabitý záporně a vodíkové atomy jsou nabitě kladně, z tohoto důvodu molekula vody v elektrickém poli zaujímá orientaci podle polarizace zobrazené na (Obr. 30).

V případě, že dojde ke střídání směru elektrického pole, bude se molekula vody vždy pohybovat ke svým pólům. Střídání lze zajištit mikrovlnným zářením a jeho vysokou frekvencí. Podle [109] dochází k tzv. *polární rotaci* neboli *frikci*. Zjednodušeně lze tento děj popsat tak, že při vstupu EMW do dřeva dochází k velmi rychlým změnám polarizace molekul vody. Dochází

k tomu, že do sebe molekuly vrážejí a vzniká tak tepelná energie. Při dostatečné energii dochází ke změně skupenství z kapalného na plynné a následně dochází k odparu.



Obr. 30: Molekula vody a její orientace v elektrickém poli – schématické znázornění.  
Převzato a upraveno z [111].

Při vstupu EMW z volného prostoru do vysoušeného materiálu se mění rychlost šíření vlny a také délka vlny, a to v závislosti na vlastnostech materiálu. O účinku interakce mikrovln s materiálem, který je mikrovlnnému záření vystaven, rozhoduje složení a struktura materiálu, jeho fyzikální stav, a také výkon a frekvence mikrovln. Mezi materiály, které jsou pro mikrovlny propustné (transparentní) patří dřevo, keramika, sklo atp. naopak mezi odrážející materiály patří, např. kovy [109].

K popisu, jak prostupuje voda strukturou dřeva existuje několik difúzních modelů, které jsou definované v různém spektru vlhkosti vody ve dřevě.

## B.9 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 [32].

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 [58] považovat za vhodně korelující s experimenty - Langmuir, Dent a BET, všechny jsou popsány dle [58]. Velice dobře použitelná je i křivka stanovená z rovnovážné vlhkosti dřeva, která je definována vztahem (5) [82]. Poslední ze zmíněných sorpčních křivek BET je zaměřená na popis, kdy voda v různém skupenství působí na povrch dřeva a smáčí ho. Pro zpřesnění numerických výpočtů lze použít některý z difúzních modelů, které lépe popisují přestup vody ve struktuře dřeva. Některé z difúzních modelů jsou stanoveny z matematických předpokladů jako je tomu u difúzního modelu Toratti [116]. Jiné sorpční křivky byly stanoveny z experimentálního měření např. Nilsson & Sandberg [87] a Jönssonem [82]. Model Sjödin a Toratti [116] 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 [87] je definovaný až do 80 % vlhkosti dřeva. Obsahuje tedy popis chování vody nad bodem nasycení vláken.

V případě zjednodušení, kdy je dřevo uvažováno jako ortotropní materiál, lze použít matici  $\mathbf{D}$  (44) dle [82]. Kde  $D_L$  je difúze v podélném směru,  $D_T$  je difúze v tangenciálním směru a  $D_R$  je difúze v radiálním směru. Hodnoty difúze jsou stanoveny v  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$$\begin{bmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_R \end{bmatrix} \quad (44)$$

Z důvodů malých rozdílů mezi  $T$  a  $R$  směrem lze podle [102] využít vztah (45) pro variace hodnot  $D_T$  a  $D_R$  pro zjednodušení

$$D_T = D_R. \quad (45)$$

Za základě experimentálních výsledků testů provedených Jönssonem [82] byla vytvořena (Tab. 5), pro kterou platí  $D_T$  a  $D_R(8,64 \cdot 10^{-7})^{(4w)}$ , kde  $w$  je hodnota relativní vlhkosti ustáleného stavu. Hodnoty  $D_L$  byly experimentálně zjištěny dle Sjöдина [82]. Difúzní model Jönsson – Sjödin je definován do 28 % relativní vlhkosti, tedy do bodu nasycení vláken. Hodnoty

v tabulce jsou vztaženy k objemové hmotnosti  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$  a výpočet byl proveden podle vztahu (46).

$$\lambda = \rho D \quad (46)$$

Tab. 5: Difúzní model Jönsson – Sjödin.

Relativní vlhkost $w$ [-]	Jönsson [kg/mh]		Sjödin [kg/mh]
	Koeficient radiální difúze $\lambda_R$	Koeficient tangenciální difúze $\lambda_T$	Koeficient podélné difúze $\lambda_L$
0,000	0,00039	0,00039	0,00076
0,050	0,00047	0,00047	0,00428
0,055	0,00048	0,00048	0,00454
0,070	0,00051	0,00051	0,00481
0,085	0,00055	0,00055	0,00497
0,090	0,00056	0,00056	0,00481
0,135	0,00067	0,00067	0,00385
0,180	0,00080	0,00080	0,00261
0,230	0,00098	0,00098	0,00178
0,280	0,00119	0,00119	0,00115

### B.9.1 Difúzní model Toratti

Difúzní model Toratti, který je definovaný do relativní vlhkosti 28 %. Tento model byl experimentálně stanoven Torattim jak je uvedeno ve zdroji [116]. Model je popsán rovnicí (47), která byla převzata z [116] a platí pouze pro radiální a tangenciální směr.

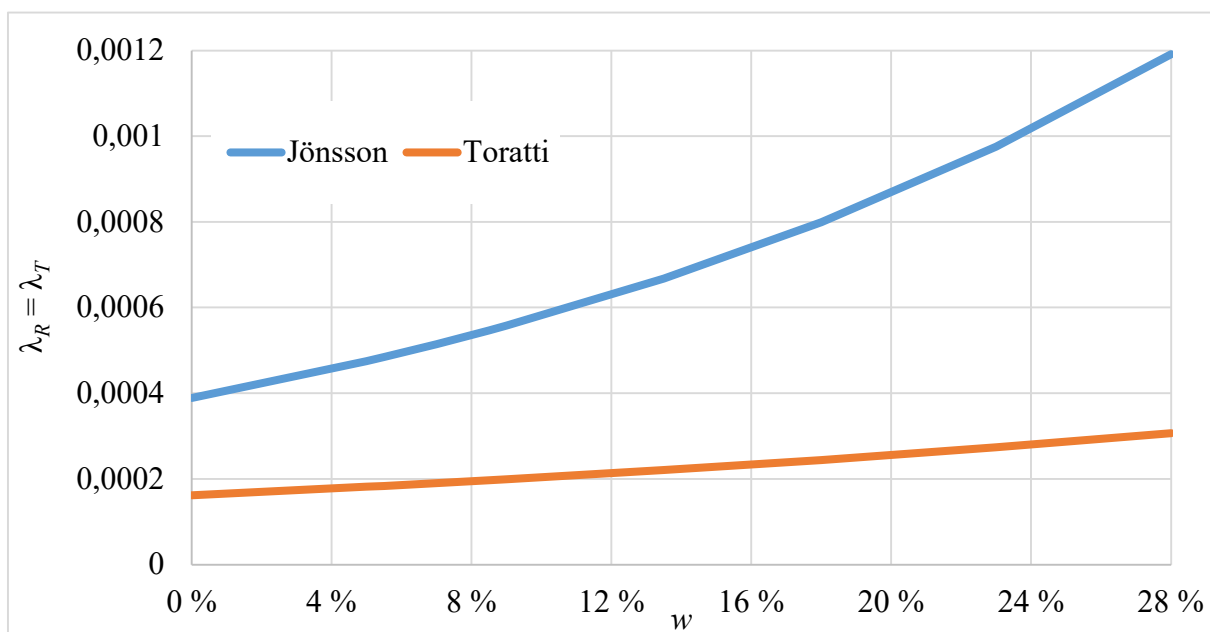
$$D_w = (1,0 \cdot 10^{-10})^{(2,28 \cdot w)} \quad (47)$$

Ze vztahu (47) je  $D_w$  difúzní koeficient vztažený k obsahu vlhkosti  $w$ . Pro použití výpočetního modelu, který byl vyvinut v rámci evropského projektu Durable Timber Bridges, který byl vedený Annu Pousette, Kjellem Arnem Maloem, Svenem Thelanderssonem a Stafanií Fortino, je potřeba pro numerický výpočet tyto hodnoty stanovit v hodinách a vynásobit je objemovou hmotností zvoleného dřeva. V (Tab. 6) jsou hodnoty  $\lambda$  upraveny pro objemovou hmotnost  $450 \text{ kg/m}^3$ . Model Toratti také uvažuje se zjednodušením, že v radiálním a tangenciálním směru je pohyb difundujících částí stejný a tedy platí vztah (45).

Tab. 6: Difúzní model Toratti.

Relativní vlhkost $w$ [-]	Toratti		
	$D_R = D_T$		$\lambda_R = \lambda_T$
	Radiální koeficient difúze [ $m^2/s$ ]	Tangenciální koeficient difúze [ $m^2/h$ ]	Koeficient radiální a tangenciální difúze [ $kg/mh$ ]
0,000	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$
0,050	$1,12 \cdot 10^{-10}$	$4,03 \cdot 10^{-7}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$
0,055	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$
0,070	$1,17 \cdot 10^{-10}$	$4,22 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$
0,085	$1,21 \cdot 10^{-10}$	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$
0,090	$1,23 \cdot 10^{-10}$	$4,42 \cdot 10^{-7}$	$1,99 \cdot 10^{-4}$
0,135	$1,36 \cdot 10^{-10}$	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$
0,180	$1,51 \cdot 10^{-10}$	$5,43 \cdot 10^{-7}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$
0,230	$1,69 \cdot 10^{-10}$	$6,08 \cdot 10^{-7}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$
0,280	$1,89 \cdot 10^{-10}$	$6,82 \cdot 10^{-7}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$

Pro vhodnější interpretaci a porovnání různých difúzních modelů Jönsson [82] a Toratti [116] byl vytvořen (Obr. 31), kde je znázorněn difúzní koeficient upravený pro objemovou hmotnost  $450 \text{ kg/m}^3$  pro radiální ( $R$ ) a tangenciální ( $T$ ) směr.

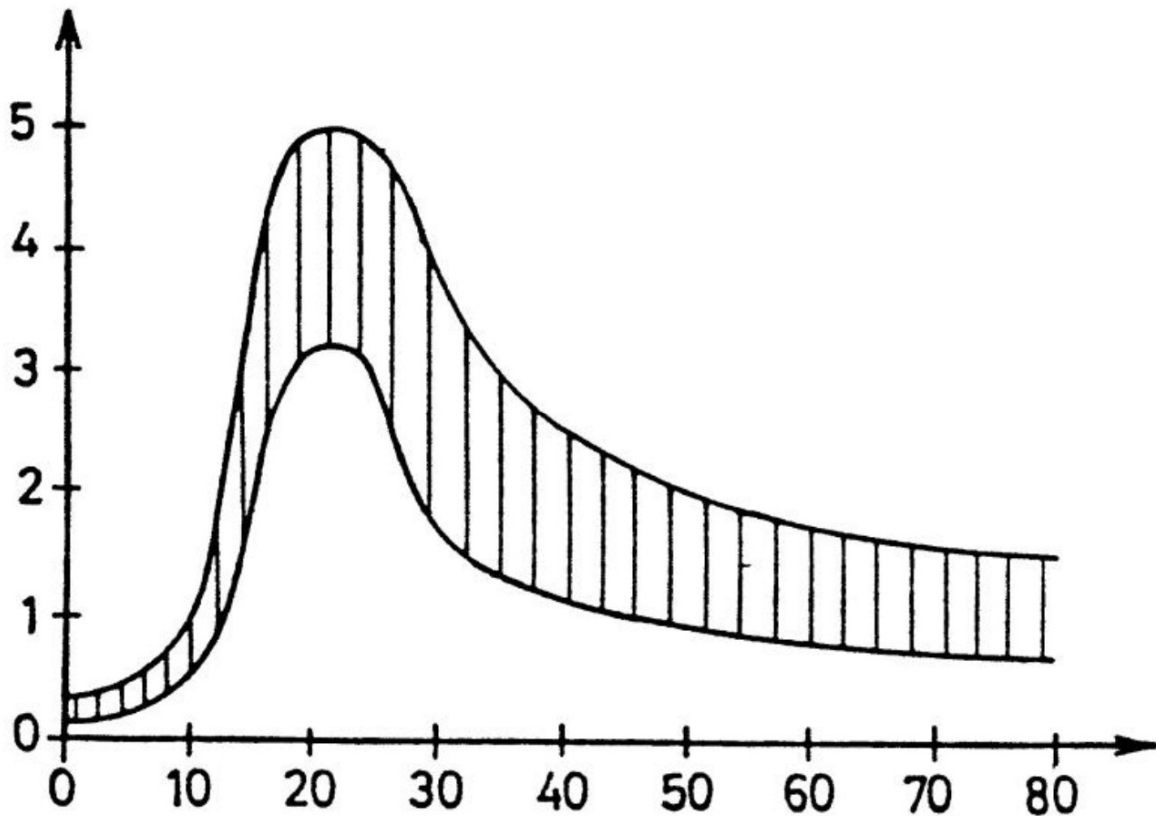


Obr. 31: Porovnání difúzních modelů Jönsson a Toratti v radiálním ( $R$ ) a tangenciálním ( $T$ ) směru.

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.9.2 Difúzní model Nilsson & Sandberg

Difúzní model Nilsson & Sandberg je definovaný až do 80 % relativní vlhkosti dřeva [87]. Hodnoty byly experimentálně stanoveny a jsou zobrazeny na (Obr. 32), který je převzat z [87]. Obrázek vychází z experimentálního měření. Pro tento model nebyl autory stanoven žádný vztah, proto došlo k interpolaci hodnot difúzních koeficientů z tohoto obrázku. Hodnoty tohoto modelu jsou uvedeny v (Tab. 7) pro objemovou hmotnost  $382 \text{ kg/m}^3$ . Pro přesnější vstup do numerického modelu byly difúzní koeficienty přepočítány na referenční objemovou hmotnost  $450 \text{ kg/m}^3$ , která odpovídá zvolené dřevině. Tento model je definovaný pro všechny tři základní směry dřeva.

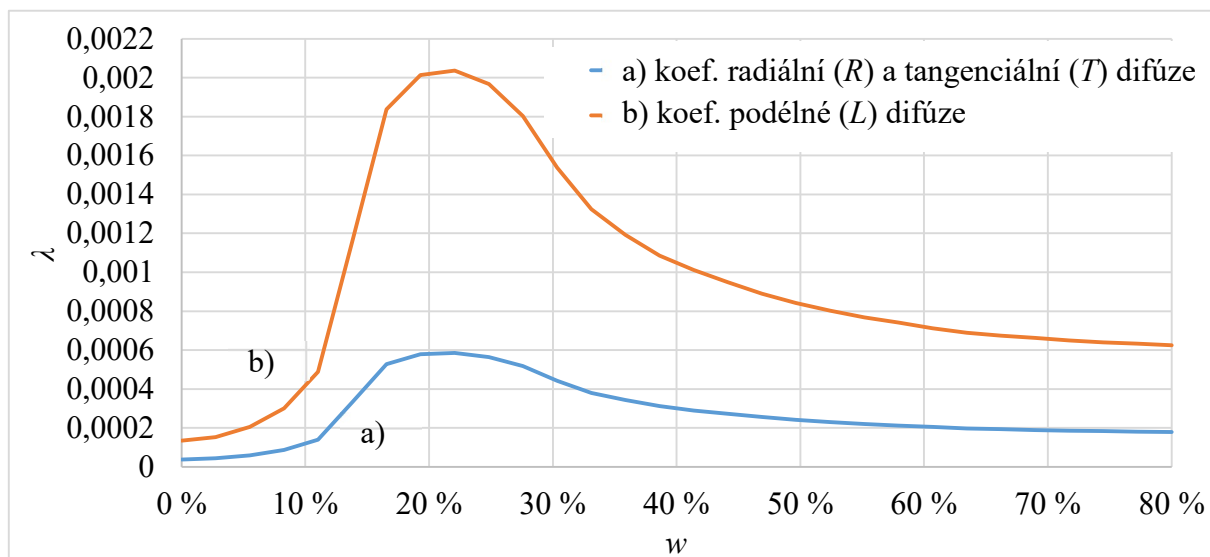


Obr. 32: Experimentální výsledky difúzního modelu Nilsson & Sandberg. Převzato z [87].

Tab. 7: Difúzní model Nilsson &amp; Sandberg.

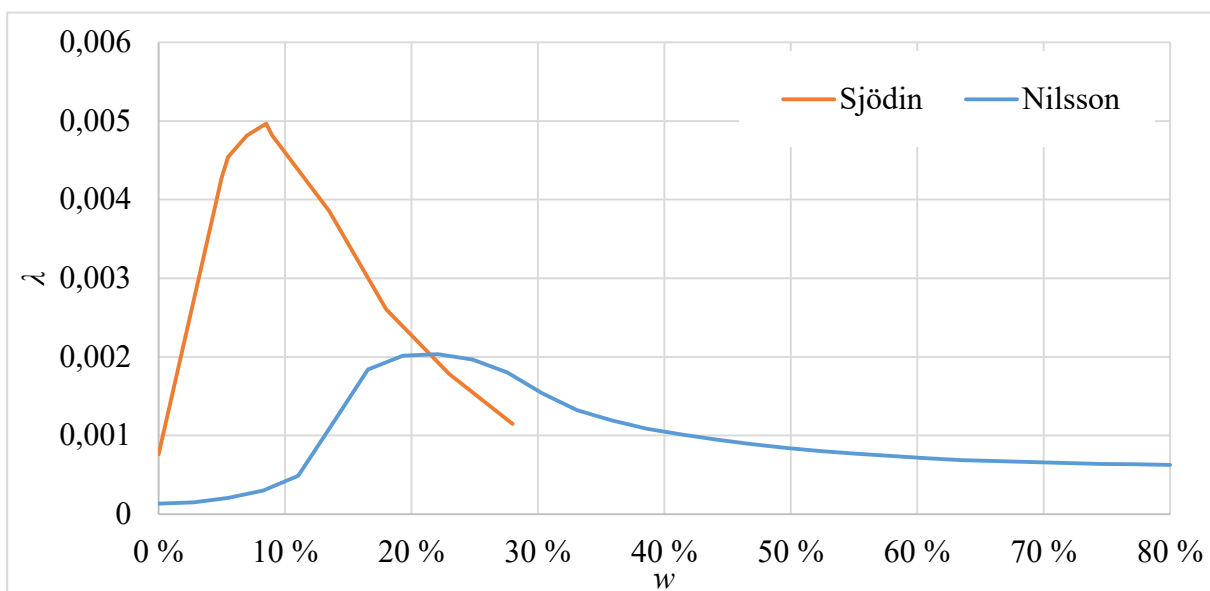
Relativní vlhkost $w$ [-]	Nilsson & Sandberg			
	Koeficient radiální a tangenciální difúze		Koeficient podélné difúze	
	$\lambda_R = \lambda_{T(382)}$ [kg/mh]	$\lambda_R = \lambda_{T(450)}$ [kg/mh]	$\lambda_{L(382)}$ [kg/mh]	$\lambda_{L(450)}$ [kg/mh]
0,000	0,00003	0,00004	0,00012	0,00014
0,028	0,00004	0,00004	0,00013	0,00015
0,055	0,00005	0,00006	0,00018	0,00021
0,083	0,00007	0,00009	0,00026	0,00030
0,110	0,00012	0,00014	0,00041	0,00049
0,138	0,00028	0,00033	0,00098	0,00116
0,166	0,00045	0,00053	0,00156	0,00184
0,193	0,00049	0,00058	0,00171	0,00201
0,221	0,00050	0,00059	0,00173	0,00204
0,248	0,00048	0,00056	0,00167	0,00197
0,276	0,00044	0,00052	0,00153	0,00180
0,303	0,00038	0,00044	0,00131	0,00154
0,331	0,00032	0,00038	0,00112	0,00132
0,359	0,00029	0,00034	0,00101	0,00119
0,386	0,00027	0,00031	0,00092	0,00109
0,414	0,00025	0,00029	0,00086	0,00101
0,441	0,00023	0,00027	0,00081	0,00095
0,469	0,00022	0,00026	0,00076	0,00089
0,497	0,00021	0,00024	0,00072	0,00084
0,524	0,00020	0,00023	0,00068	0,00080
0,552	0,00019	0,00022	0,00065	0,00077
0,579	0,00018	0,00021	0,00063	0,00074
0,607	0,00017	0,00020	0,00061	0,00071
0,634	0,00017	0,00020	0,00059	0,00069
0,662	0,00016	0,00019	0,00057	0,00068
0,690	0,00016	0,00019	0,00056	0,00066
0,717	0,00016	0,00019	0,00055	0,00065
0,745	0,00016	0,00018	0,00054	0,00064
0,772	0,00015	0,00018	0,00054	0,00063
0,800	0,00015	0,00018	0,00053	0,00062

Na (Obr. 33) jsou zobrazeny průběhy středních hodnot difúzních koeficientů vztažených k objemové hmotnosti  $450 \text{ kg/m}^3$ . Křivka, která je na (Obr. 33) označena a), zobrazuje radiální ( $R$ ) a tangenciální ( $T$ ) koeficienty difúze. Křivka b) znázorňuje koeficienty podélné ( $L$ ) difúze. Z (Obr. 33) lze odvodit, že v podélném ( $L$ ) směru je difúze výrazně větší.



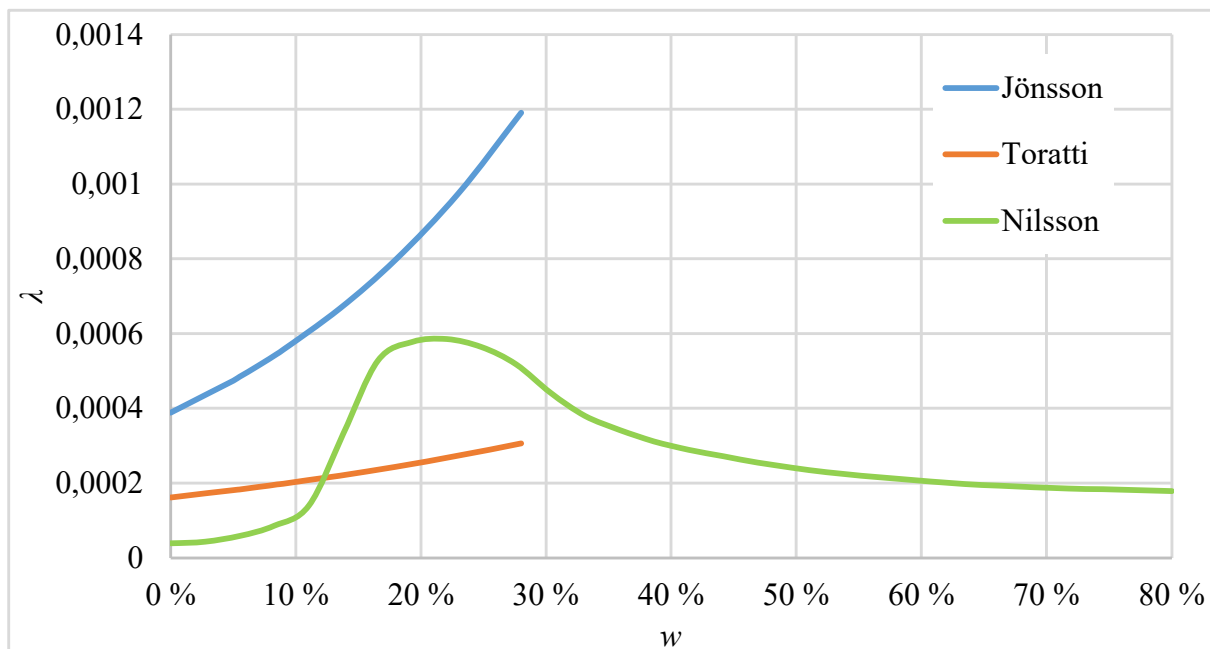
Obr. 33: Difúzní model Nilsson & Sandberg pro všechny směry ( $L$ ), ( $R$ ) a ( $T$ ).

Na (Obr. 34) jsou porovnány difúzní modely, které jsou definované v podélném směru. Jedná se o difúzní modely Sjödin a Nilsson & Sandberg. Data jsou vztažena k referenční objemové hmotnosti  $450 \text{ kg/m}^3$ .



Obr. 34: Porovnání difúzních modelů v podélném ( $L$ ) směru.

Porovnání difúzních modelů Jönsson, Toratti a Nilsson je uvedeno na (Obr. 35). Graf je vytvořen pro referenční objemovou hmotnost  $450 \text{ kg/m}^3$  pro radiální a tangenciální směr, které jsou shodné.



Obr. 35: Porovnání tří difúzních modelů v radiálním ( $R$ ) a tangenciálním směru ( $T$ ).

## B.10 Popis transportu vody ve dřevě

Transport vody ve dřevě lze popsat buď jednofázovým modelem, který se v anglické literatuře označuje jako „Single phase model“, [43] a [62] nebo pomocí více fázového modelu, v anglické literatuře označovaný jako „Multi phase model“, popsaného v [45] a [75]. 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 sarpce, tak i desorpce. 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.

### B.10.1 Jednofázový model

Vlhkostní transport lze popsat obecně pomocí třídimenzionální Fickovy rovnice (48) dle [41].

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla w) , \quad (48)$$

kde  $w$  je vlhkost ve dřevě, kterou lze stanovit z rovnice (62),  $\mathbf{D}$  je matice vlhkostního prostupu, kde se koeficienty vyberou podle zvolených difúzních modelů. Vlhkostní tok ze vzduchu na povrch vzorku je popsán podle [41] vztahem (49)

$$q_n = \rho_0 S (w_{air} - w_{surf}) \quad , \quad (49)$$

kde  $q_n$  je hodnota toku přes hranici,  $\rho_0$  suchá hustota dřeva,  $S$  koeficient povrchové emise,  $w_{air}$  představuje rovnovážný obsah vlhkosti dřeva odpovídající vlhkosti vzduchu, kterou lze stanovit z rovnice (5) a  $w_{surf}$  je obsah vlhkosti na povrchu dřeva.

Koeficient povrchové emise závisí na tom, jak je povrch ošetřen. V případě, že je povrch neošetřený nátěrem, tak je hodnota povrchové emisivity  $S = (3,2 \cdot 10^{-7})^{(4w)}$  [44] s jednotkou [m/s]. V případě nějakého nátěru lze koeficient povrchové emisivity opravit podle [44] s použitím vztahu (50)

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_{surf}} + \frac{1}{S_{paint}} \quad , \quad (50)$$

kde  $S_{paint}$  je koeficient nátěru nebo jiné ochrany dřeva. Hodnota  $S$  podle Torattiho [116] je rovna  $S = 1,28 \cdot 10^{-7}$  a dle Hanhijärviho [49] je  $S = 3,2 \cdot 10^{-8}$ .

### B.10.2 Vícefázový model

Pro definici hygrotermálního nebo-li teplotně vlhkostního chování ve dřevě pomocí vícefázového modelu lze použít následující vztahy (51), (52) a (53), které jsou popsány Stefanií Fortino a kolektivem v [41].

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D}_b \nabla c_b) + c \quad (51)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D}_v \nabla c_v) + c \quad (52)$$

$$c_w \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{D}_b \nabla c_b) h_b + \nabla \cdot (\mathbf{D}_v \nabla c_v) h_v + c h_{bv} \quad (53)$$

Vztah (51) a (52) popisuje transport a vztah (53) vyjadřuje vztah zachování energie. Vevztazích jsou neznámými:  $c_b$  koncentrace vázané vody,  $c_v$  koncentrace vodní páry a  $T$  teplota.  $\mathbf{D}_b$  a  $\mathbf{D}_v$  představují difúzní tenzory pro vodu a vodní páru.  $\mathbf{K}$  tenzor tepelné vodivosti,  $c_w$  specifické teplo,  $\rho_0$  hustota suchého dřeva,  $h_b$  a  $h_v$  specifické entalpie vázané vody a vodní páry,  $h_{bv}$  specifická entalpie přechodu od vody vázané k vodní páře, kterou lze stanovit ze vztahu (54) [41]

$$h_{bv} = h_b - h_v \quad (54)$$

Na plochách, které jsou v kontaktu se vzduchem se předpokládá hraniční stav na koncentraci vázané vody, který lze popsat okrajovou podmínkou  $\nabla_c = 0$ , zatímco tok vodní páry je vyjádřen vztahem [41]

$$-n \cdot \mathbf{D}_v \nabla c_v = k_v (c_v' - c_v^a), \quad (55)$$

kde  $c_v^a$  je koncentrace vodní páry okolního prostředí,  $k_v$  představuje koeficient povrchové emise pro vodní páru a  $c_v'$  je koncentrace vodní páry na základě objemu buňky. Výměna vlhkosti mezi dřevem a okolním prostředím se vypočítá na základě vztahu z [41]

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{k_{vs}} + \frac{1}{k_p}, \quad (56)$$

kde  $k_v$  je součinitel přenosu hmoty toku vodních par,  $k_{vs}$  koeficient emisí pro nekryté dřevo a  $k_p$  koeficient emisí pro kryté dřevo.

Vícefázový model nezohledňuje teplotní závislost sorpčních izoterm. Teplota v tomto modelu je zohledněna v koeficientech difúzních funkcí a také v matici difúze vodní páry, která závisí na parciálním tlaku vodních par. Rovnice parciálních vodních par má podle [41] tvar

$$p_v = w_{rel} p_{vs}, \quad (57)$$

kde  $p_{vs}$  je tlak nasycených vodních par, který je závislý na teplotě a  $w_{rel}$  je relativní vlhkost. Empirické vztahy pro tlak vodních par nad bodem mrazu (58) a pod bodem mrazu (59) jsou určeny v [41]

$$p_v = p_{v;273,16} \cdot 10^{\left(53,421 - \frac{6513,3}{T} - 4,125 \cdot \ln(T)\right)}, \quad (58)$$

$$p_v = p_{v;273,16} \cdot 10^{\left(\frac{9,5(T-273,15)}{T-7,65} + 0,7858\right)}, \quad (59)$$

kde  $p_v$  je tlak vodních par k vodě (ledu) a  $p_{v;273,16}$  je tlak vodních par k vodě (ledu) při teplotě 273,16 K,  $T$  je teplota ve stupních Celsia.

## B.11 Hodnoty vybraných vlastností dřeva dle literatury

MOE smrku ztepilého (*Picea abies* L.) má dle [96] a [100] hodnotu 12 800 MPa a dle [68] dosahuje hodnoty 11 000 MPa.

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) má hodnotu MOE 12 000 MPa dle [68]. Dle [95] je průměrná hodnota MOE Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) 11 825 MPa. Tato hodnota byla stanovena na základě experimentálního měření v souladu s normou ČSN EN 408 [29] na vzorcích o rozměrech 25 × 25 × 625 mm. Vlhkost zkušebních těles byla měřena na průměrnou hodnotu 12 %, jak je ve zdroji [95] uvedeno.

Pro porovnání zjištěných hodnot pružnosti  $E$  nebo pevnosti  $\sigma$  u dřeva o jiné vlhkosti než je uvedena v tabulkách jako referenční, která je vztažena k vlhkosti 12 %, je nutné využít přepočtových vztahů. Přepočtový vztah pro MOE dřeva  $E_w$  platí (60) a pro přepočet pevnost  $\sigma_w$  platí (61). Kde  $w$  je skutečná vlhkost dřeva.

Změna pevnosti dřeva má v závislosti na změně obsahu vázané vody nelineární průběh, který v intervalu 9 % – 15% lze nahradit přímkou [96]

$$E_{12\%} = E_w + \alpha (w - 12), \quad (60)$$

$$\sigma_{12\%} = \sigma_w (1 + \alpha (w - 12)). \quad (61)$$

Opravné koeficienty  $\alpha$  vyjadřující vliv vlhkosti na danou vlastnost lze nalézt v [96] a jsou závislé na způsobu namáhání dřeva. Např. pro tlak ve směru vláken je  $\alpha = 0,04$ , pro statický ohyb je  $\alpha = 0,04$  a pro tah ve směru vláken je  $\alpha = 0,01$ .

Tab. 8: MOR vybraných dřev v ohybu při vlhkosti 12 % a nad mezí hygroskopicity (podle Ugoleva 1975 a 1986) [96] a [100].

Druh dřeva	MOR při vlhkosti [MPa]	
	$w = 12 \%$	$w = 30 \%$
Borovice lesní ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)	86	50
Smrku ztepilého ( <i>Picea abies</i> L.)	80	44

Vlivem tepelného ošetření dřeva dochází podle [90] a [91] ke změně chemického složení dřeva. Při vyšších teplotách dochází k nevratným chemickým změnám, a to hlavně v depolymerizaci a ztrátě hygroskopických hemicelulóz, tak dokládá [114]. Zdroj [17] dále uvádí, že vlivem tepelného ošetření dřeva se snižují i sorbční vlastnosti dřeva. Této vlastnosti se využívá například při úpravě dřeva na dřevo pod označením „ThermoWood“ [121]. Tepelně ošetřené dřevo je tedy odolnější než dřevo neošetřené.

Tab. 9: Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro dřevo vybraných dřevin při vlhkosti 12 % a nad mezí hygroskopicity (podle Ugoleva 1975) [96] a [100].

Druh dřeva	Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken [MPa]	
	$w = 12 \%$	$w = 30 \%$
Borovice lesní ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)	48,5	21,0
Smrku ztepilého ( <i>Picea abies</i> L.)	44,4	19,5

## B.12 Způsob získání klimatických dat

Pro případ, kdy pro numerické výpočty nejsou k dispozici klimatické měření například díky výpadku elektrického proudu nebo jiné poruše, lze tyto data nalézt na European centre for Medium-Range Weather Forecast – ECMWF [36] (Evropské středisko pro střednědobé

předpovědi počasí). Zdroj ECMWF [36] obsahuje různé databáze, které se liší obsahem naměřených hodnot, a také dobou po kterou data ukládala. Databáze ERA – Interim [39], obsahuje dlouhodobé měření s častým záznamem hodnot. Z tohoto důvodu byla databáze ERA – Interim vybrána jako nejvhodnější pro potřeby numerických výpočtů. Jedná se o globální atmosférická data zaznamenávána od roku 1979. Lze si vybrat místo buď pomocí souřadnic GPS nebo podle kontinentu. Lze zde nalézt různá klimatická data od teploty, stupně oblačnosti až po albedo. Různá klimatická data jsou ukládána s rozdílnou hustotou. Teplota je ukládána do této databáze po 6 hodinách. Srážky jsou ukládány jen po 12 hodinách. Relativní vlhkost prostředí zde není uvedena, ale lze jí vypočítat ze vztahů (62), (63), (64), (65) a (66) převzatých z [82]. Do výpočtu relativní vlhkosti  $w$  vstupují dva druhy teplot, a to teplota měřená ve dvou metrech na povrchem  $t_{2m}$  a teplota rosného bodu  $t_{dp2m}$ . Vztah (62) a (63) se používá pro teplotu měřenou 2 metry nad zemí  $t_{2m}$ . Vztah (62) se používá pro teploty nad 0 °C a vztah (63) pro teploty nižší. Podobně to platí pro teplotu rosného bodu  $t_{dp2m}$ , který se vypočítá ze vztahů (64), (65). Vztah (64) je pro výpočet teplot na 0 °C a vztah (65) pro teploty nižší než 0 °C. Pro přepočtení na relativní vlhkost se použije vztah (66). Pro snadnější orientaci jaké vztahy použít, byl vytvořen vývojový diagram, který je uveden na (Obr. 36).

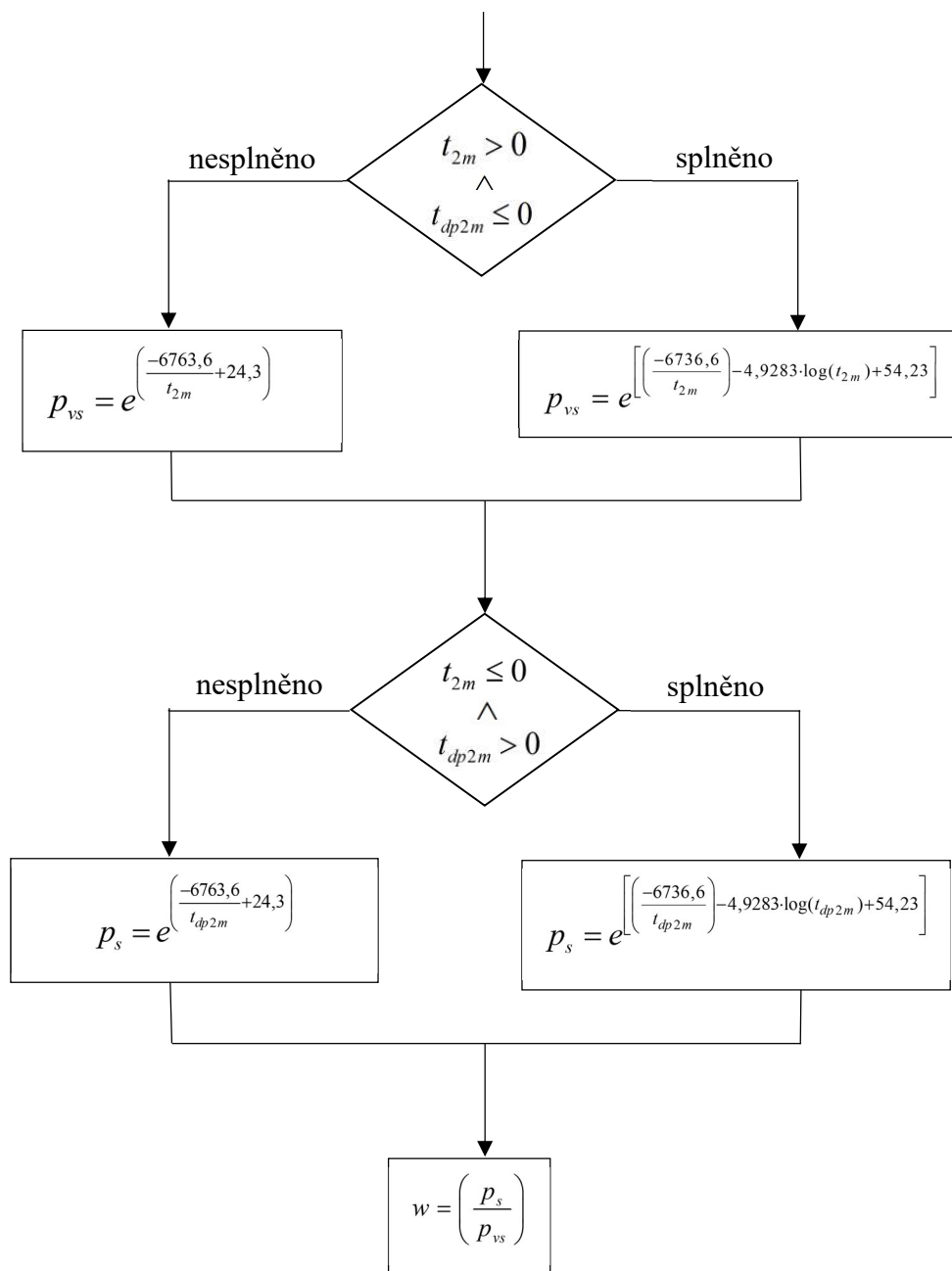
$$p_{vs} = e^{\left[ \left( \frac{-6736,6}{t_{2m}} \right) - 4,9283 \cdot \log(t_{2m}) + 54,23 \right]} \quad (62)$$

$$p_{vs} = e^{\left( \frac{-6763,6}{t_{2m}} + 24,3 \right)} \quad (63)$$

$$p_s = e^{\left[ \left( \frac{-6736,6}{t_{dp2m}} \right) - 4,9283 \cdot \log(t_{dp2m}) + 54,23 \right]} \quad (64)$$

$$p_s = e^{\left( \frac{-6763,6}{t_{dp2m}} + 24,3 \right)} \quad (65)$$

$$w = \left( \frac{p_s}{p_{vs}} \right) \quad (66)$$

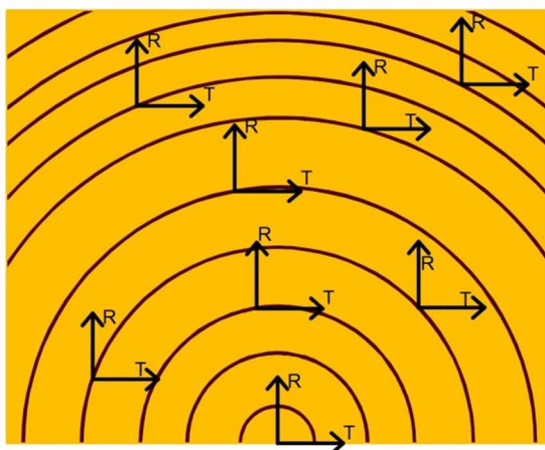


Obr. 36: Vývojový diagram pro výpočet relativní vlhkosti vzduchu  $w$  z teploty ve 2 m a teploty rosného bodu.

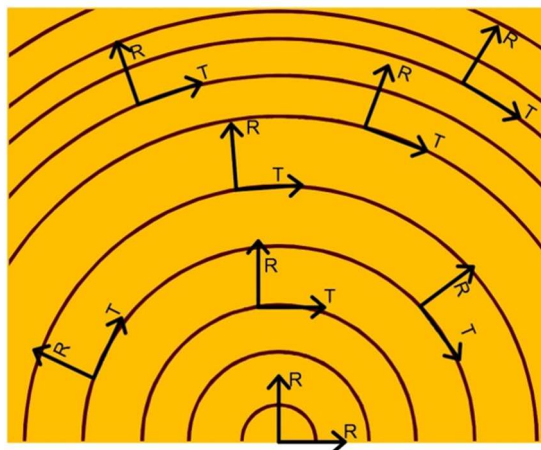
## B.13 Způsoby modelování v MKP

Pro numerické simulace v programu pracující na principu metody konečných prvků (MKP) je potřeba vytvořit výpočtový model. Výpočtový model musí mít jasně definovanou geometrii, okrajové podmínky (zatížení, vlhkost, teplota, ...) a materiálové vlastnosti (dřevo, kov, ...).

Například pro výpočet lamelového nosníku, který je složený z více lamel, které mají různé orientace vláken, je vhodné využít rozdílné souřadnicové systémy. Pro celý lamelový nosník se zvolí globální souřadnicový systém zobrazený na (Obr. 37). Dále se pro každou jednotlivou lamelu definuje lokální cylindrický souřadnicový systém zobrazený na (Obr. 38). Cylindrický souřadný systém např. dle [95] lépe zohledňuje složitý materiálový model dřeva než systém globální.



Obr. 37: Globální souřadnicový systém.



Obr. 38: Lokální cylindrický systém.

## 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 [110]. Volba byla provedena i s ohledem na co největší využití získaných výsledků v praxi. Nejpoužívanějším dřevinou na konstrukční účely pozemních staveb jsou podle [110] 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 vypočtů s naměřenými hodnotami.

Pro provedení jednotlivých experimentů byly využívány laboratoře a laboratorní vybavení Ústavu pozemního stavitelství a Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Metodika měření mechanických a elastických vlastností byla převzata z normových požadavků pro jednotlivé mechanické zkoušky. Pro vysoušení vzorků v sušárně byla z důvodů absence vhodné metodiky vypracována nová metodika, která popisuje změny pozic vzorků, aby bylo zajištěno, že každý vzorek je na jiném místě než byl před vyjmutím ke kontrolnímu vážení s ohledem na vyloučení systematické chyby při měření [120].

## 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 [58]. Při použití přesnějších hodnot získaných z experimentů do numerických výpočtů se zvýší přesnost výsledků. V tomto experimentu byla na poslední třetinu vzorků použita metoda vysoušení pomocí EMW. Před vysoušením pomocí EMW byly vzorky zvlhčeny na 30 % relativní vlhkosti. Cílem EMW vysoušení bylo porovnání změn zkoumaných mechanických a elastických vlastností dřeva. Pro zjišťování vlhkosti dřeva byla použita gravimetrická metoda pro svoji vysokou přesnost.

Experiment 1 (EX1) probíhal podle normových požadavků normy ČSN EN 384 (73 1712) *Konstrukční dřevo – stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty* [28] a normy ČSN EN 408 (73 1741) *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností* [29]. Experiment probíhal na smrku ztepilém (*Picea abies* L.) i na borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Podle požadavků norem ČSN EN 384 (73 1712) [28] a ČSN EN 408 (73 1741) [29] byly stanoveny rozměry zkušebních těles na  $25 \times 25 \times 475$  mm s ohledem na nejmenší délku zkušebního tělesa podle ČSN EN 408 [29] rovné 19-ti násobku výšky průřezu. Každá dřevina se testovala při třech různých vlhkostech, které jsou popsány v (Tab. 10):

- 9 % – 12%,
- 30 %,
- 9 % – 12%, které bylo dosaženo vysoušením 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 Memmert UN, která je zobrazena na (Obr. 39). Cílem umístění vzorků do sušárny a jejich vysušení proběhlo za účelem stanovení hmotnosti suchého vzoru  $m_0$ , ze které lze za použití vztahu (9) určit absolutní vlhkost vzorku, nebo pomocí vztahu (10) 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  $90^\circ$ .



Obr. 39: Sušárna Memmert UN.

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 (Obr. 40).



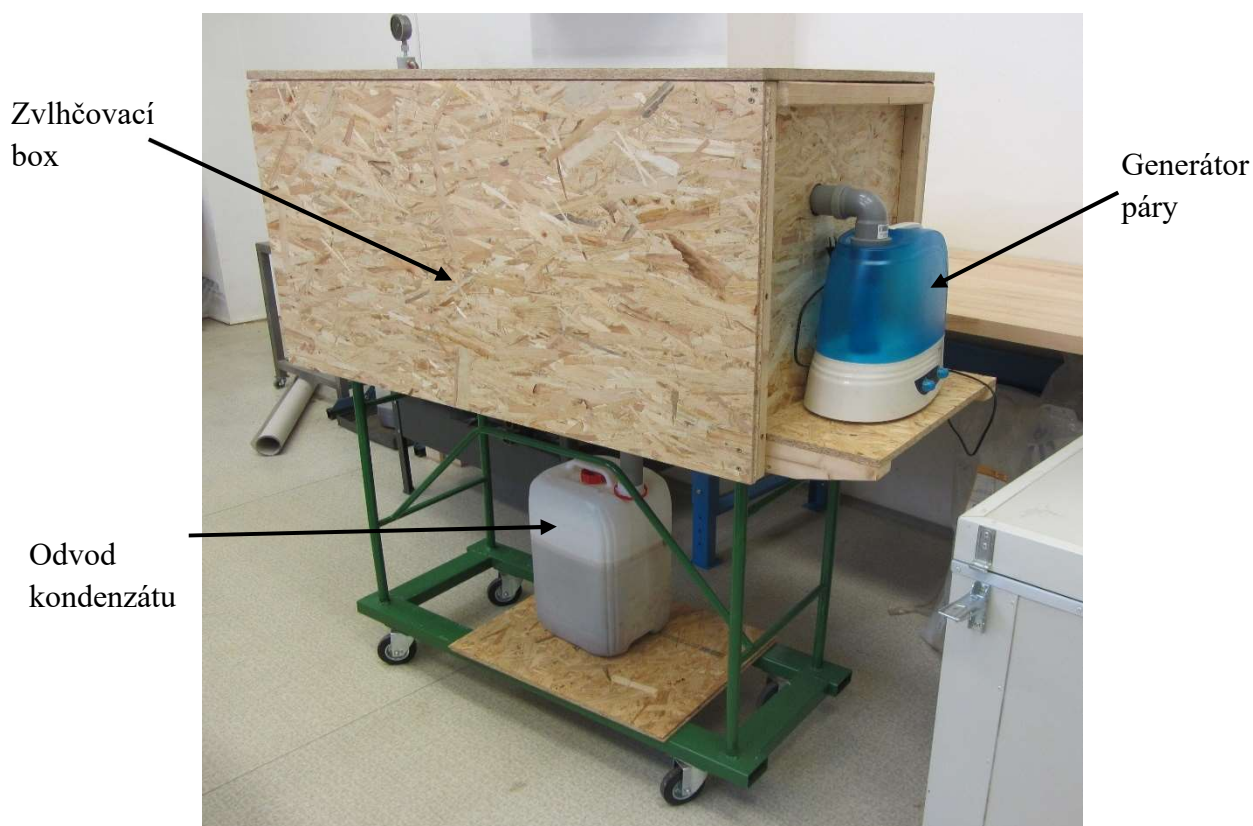
Obr. 40: Analytická váha KERN KB 360-3N.

Pro kontrolu rozložení teplotního pole v sušárně bylo do každé vrstvy vzorků umístěno teplotní čidlo, které zaznamenávalo teplotu po 300 s. Z analýz měření teplotního pole bylo zjištěno, že teplotní pole je v celém objemu sušícího prostoru sušárny konstantní.

Tab. 10: Zkušební série.

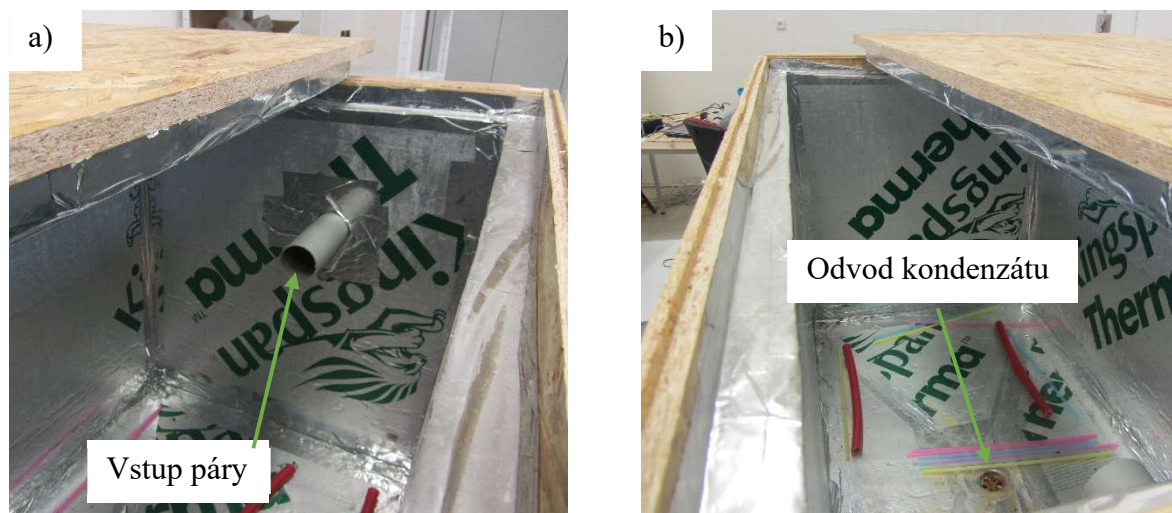
	Série 1	Série 2	Série 3
Smrk ztepilý ( <i>Picea abies</i> L.)	Vlhkost dřeva 9 % – 12 %	Vlhkost dřeva 30 %	Vlhkost dřeva 9 % – 12 %, které bylo dosaženo EMW vysoušením z 30 %
Borovice lesní ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)			

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. 41). Zde byly vzorky vystaveny vlhkému prostředí, které bylo vytvářeno přehřátou párou, z důvodů dříve popsaného závěru, že vyšší teplota usnadňuje prostup vody do struktury dřeva, jak uvádí zdroj [58]. 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. 41: 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 chránila desky OSB boxu před vysokou vlhkostí, která byla v průběhu měření uvnitř boxu.

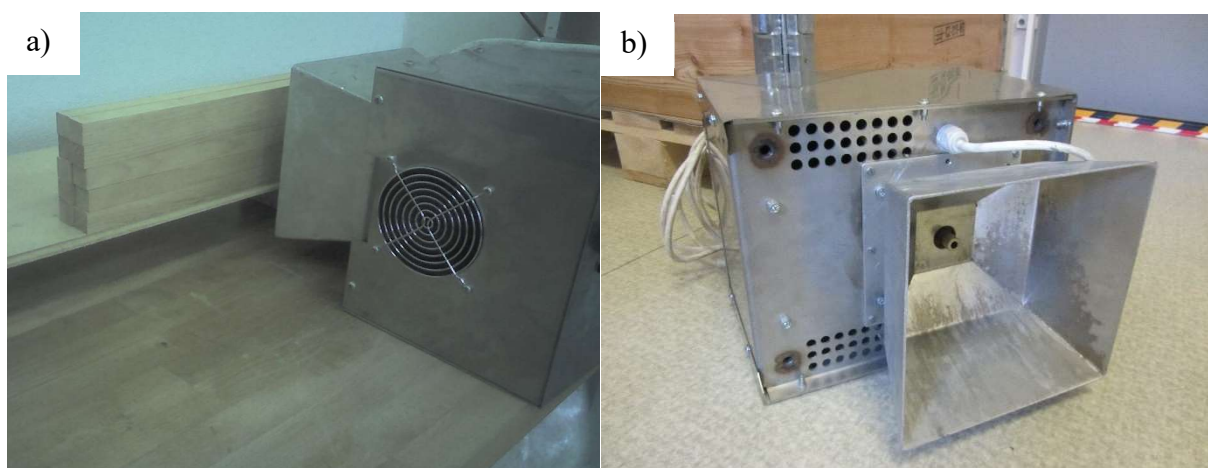


Obr. 42: Vnitřní část zvlhčovacího boxu.

Vlhkost byla vytvářena generátorem mlhy, který byl umístěn z venkovní strany zvlhčovacího boxu. Pro experiment byl použit generátor Profesor Z70. Pára prostupovala do toho boxu přes otvor ve stěně, který je vidět na (Obr. 42 a). Pára byla v boxu rovnoměrně rozdělována pomocí větráku. Přebytný kondenzát byl odváděn v nejnižším místě, které je vidět na (Obr. 42 b). Vzorky byly průběžně kontrolovány a byla zaznamenávána jejich váha, ze které se následně stanovila relativní vlhkost. Při každém měření byla používána stejná metodika jako v případě vysoušení, kde byl kladen důraz na odlišné pořadí jednotlivých vzorků z důvodů eliminace systematické chyby. Po dosažení stanovené vlhkosti uvedené v (Tab. 10) bylo zvlhčování zastaveno a série 2 byla mechanicky zkoušena.

Vzorky série 3 byly následně vysušeny EMW zářením, průběh je zdokumentován na (Obr. 43 a). Pro vysoušení byl použit mikrovlnný generátor Romill (Obr. 43 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.

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. 43 a).



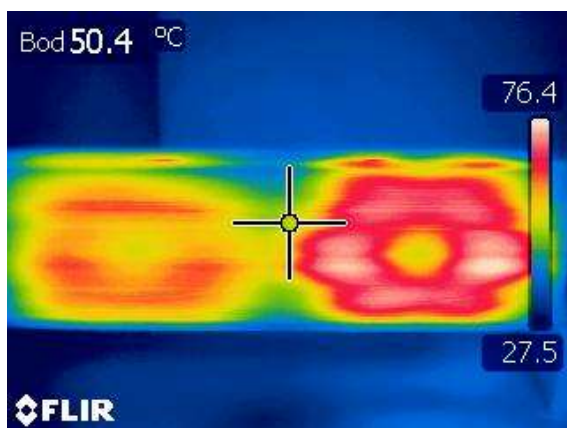
Obr. 43: a) Z průběhu vysoušení pro sérii 3, b) Generátor Romill – čelní pohled.

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. 45), 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 (Obr. 44). Příklad termogramů z průběhu vysoušecího cyklu je zobrazen na (Obr. 46), kde je velice dobře

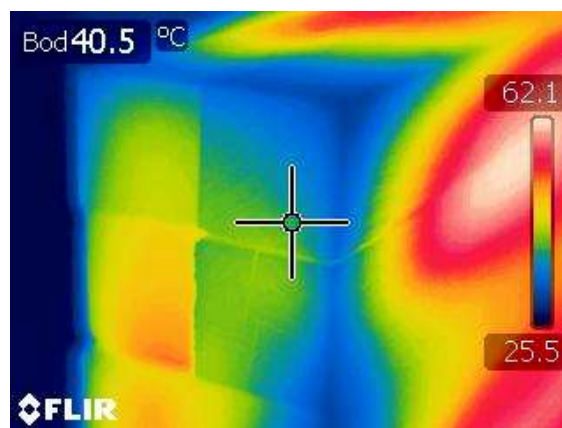


Obr. 44: Termokamera Flir B425.

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  $9\% - 12\%$  uvedená v Tab. 10.



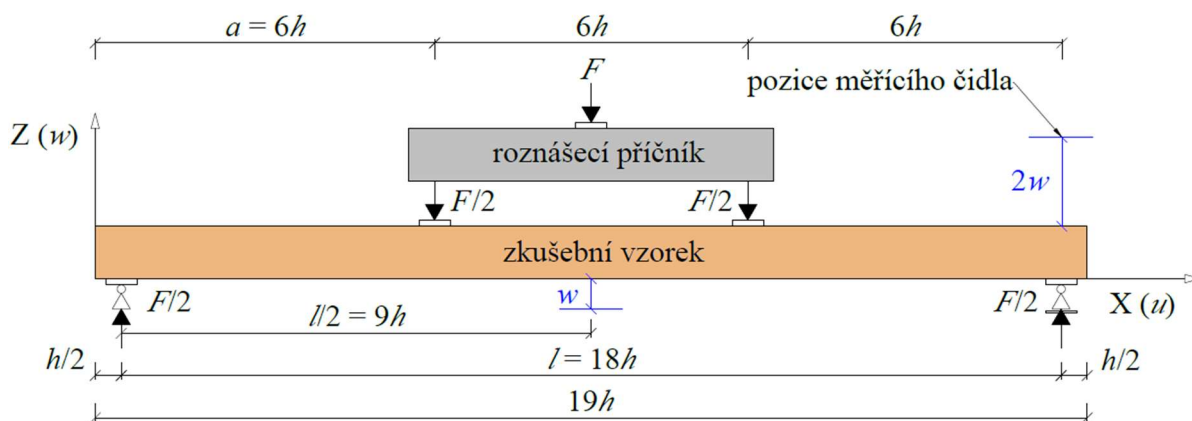
Obr. 45: Rozložení teplotního pole po druhé části vysoušení.



Obr. 46: Detailní rozložení teplotního pole.

### D.1.1 Mechanické testování

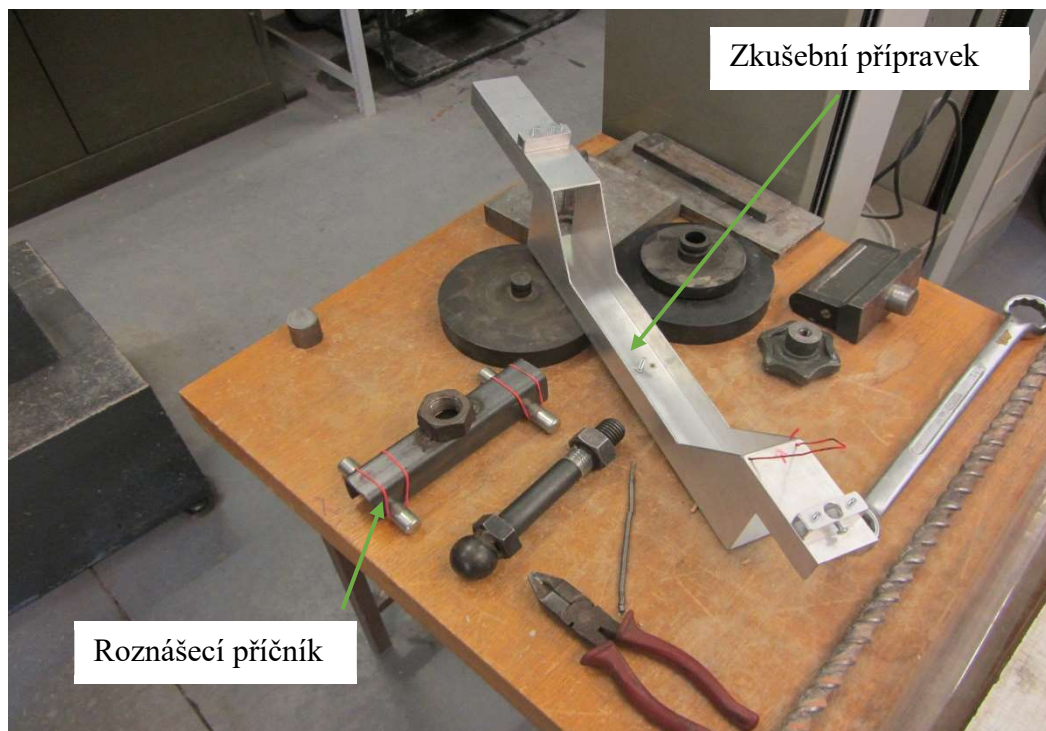
Vzorky, které byly připraveny k mechanickému testování, se před transportem obalily LDPE samosmršťující folií. Tímto postupem byl eliminován vliv okolní vlhkosti, které by mohlo zkreslit výsledky mechanických zkoušek. Zkoušky byly provedeny v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, 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 [29]. Zatěžovací schéma pro zkušební tělesa na čtyřbodový ohyb je zobrazené na (Obr. 47). 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. 47).



Obr. 47: Zatěžovací schéma pro čtyřbodový ohyb.

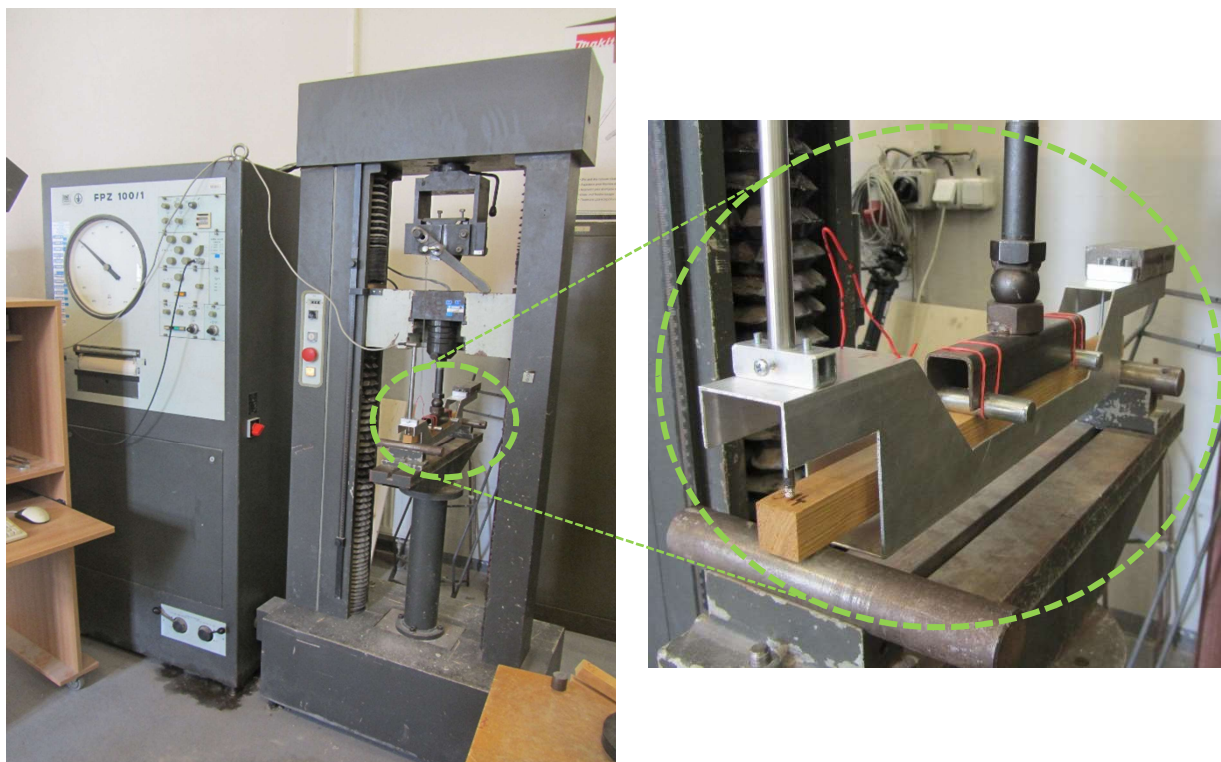
Zkušební sestava byla doplněna o vyvinutý hliníkový přípravek, který je zobrazený na (Obr. 48). Přípravek eliminoval vybočení zkušebních těles při umožnění jejich deformace v rovině působení zatížení. Přípravek byl na horním povrchu osazen indukčnostním snímačem dráhy HBM WA-T/50 mm [95] s měřicím rozsahem 0 až 50 mm s přesností měření 0,001 mm. Snímač zaznamenával svislý posun  $w$ . Celá zkušební soustava je vidět na (Obr. 49). K symetrickému roznosu zatěžovací síly byl použit ocelový roznášecí příčnick zobrazený na (Obr. 48). 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 [95], která byla spojena s počítačem. Vizualizace průběhu zatěžování byla on-line zobrazována na monitoru s využitím programu Catman Easy [16]. 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. Neotestované vzorky byly opět zabaleny do LDPE samosmršťující folie a vráceny do stabilizačního boxu, kde byly uloženy do následujícího dne, kdy experiment pokračoval další fází. Zkušební norma ČSN EN 408 (73 1741) [29] neudává orientaci vláken při zkoušení, i když orientace vláken ovlivňuje výsledky, jak je například uvedeno ve zdroji [56]. Přesné orientace vláken zkoušených těles byly zaznamenány, aby mohly být použity k dalšímu zkoumání.

Ze statisticky vyhodnocených naměřených dat byl stanoven lokální MOE a MOR. Tyto elastické a materiálové konstanty jsou uvedeny v (Tab. 12).



Obr. 48: Zkušební přípravek a roznášecí příčník.

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



Obr. 49: 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 [29] 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 (67) podle [29], 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  $F_2 - F_1$ .

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (67)$$

V případě, že v rozmezí  $0,2 F_{max,est}$  až  $0,3 F_{max,est}$  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

Pevnost v ohybu  $f_m$  lze stanovit ze vstahu (68) [29], který byl převzat z ČSN EN 408 (73 1741) [29] nebo lze použít vztah (69), kde není rozepsaný průřezový modul  $W$ .

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}, \quad (68)$$

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad (69)$$

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

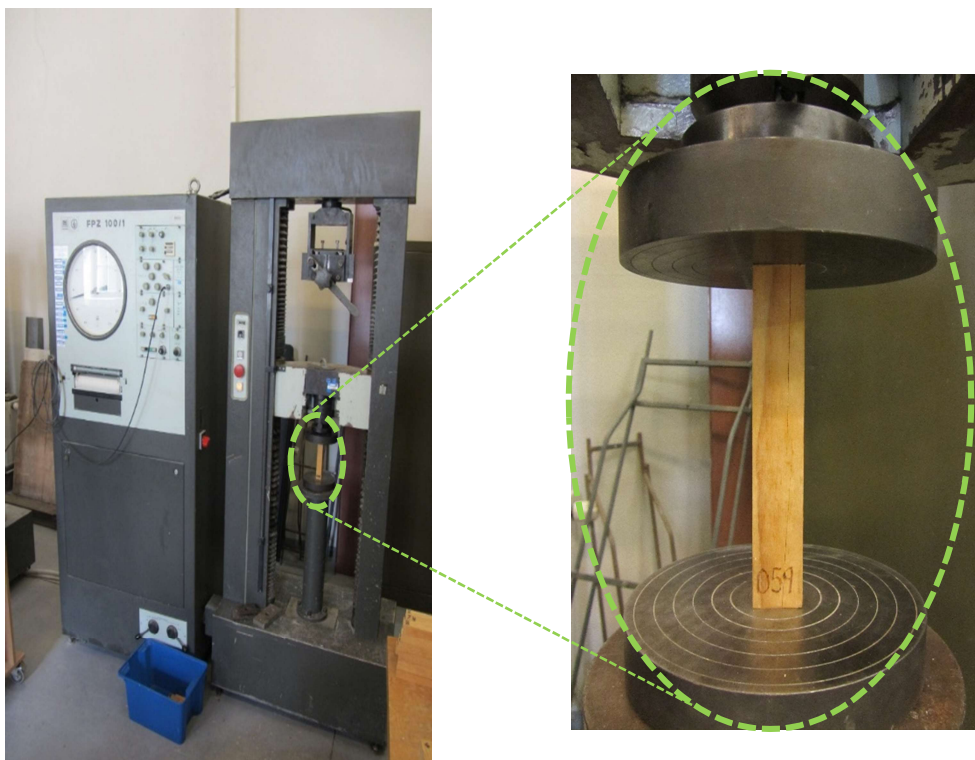
Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny probíhalo dle ČSN EN 408 (73 1741) [29]. Zkušební těleso musí mít plný průřez a délku odpovídající 6-ti násobku menšího průřezového modulu. Vzhledem k tomu byly zvoleny rozměry zkušebních vzorků s plným čtvercovým průřezem o straně 25 mm s výškou 150 mm. 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) [29] 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 (70) [29], kde  $F_{\max}$  je maximální dosažená síla v [N] a  $A$  je plocha průřezu vzorku v [mm<sup>2</sup>].

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (70)$$

Na (Obr. 50) je zobrazena zatěžovací soustava při zkoušce tlaku rovnoběžně s vlákny.



Obr. 50: 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

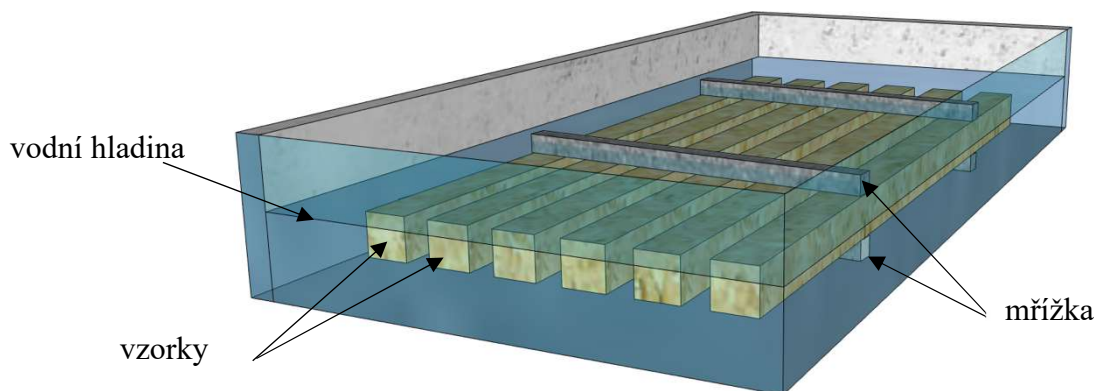
Cílem experimentální části vysoušení vzorků s vysokou vlhkostí bylo stanovit vhodný čas, který by nejefektivněji vysušoval vzorky Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) bez viditelného poškození výsušnými trhlinami.

Pro stanovení vlhkosti dřeva byla zvolena gravimetrická metoda. Při použití této metody je nutné stanovit hmotnost suchého vzorku  $m_s$  nebo  $m_0$  (označení závisí na použitém zdroji). Vzorky se umístily do sušárny Memmert UN 30 zobrazené na (Obr. 51), kde byla nastavena teplota na +103 °C. Hmotnost vzorků byla zjišťována pomocí laboratorní analytické váhy KERN AS 220.R2 s váživostí do 220 g s přesností vážení na 1 mg a chybou 0,1 mg. 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 [18] a [26], tak kontrolní vážení probíhalo po dvou hodinách, jak udává [18], [26] i [58]. Po splnění podmínky [26] byly vzorky vyňaty ze sušárny a byla zaznamenána jejich suchá hmotnost  $m_s$ .



Obr. 51: Sušárna Memmert UN 30.

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 [70] již gravimetrická metoda ovlivněna vysokou chybou. Zvlhčování probíhalo ve vodní lázni, tak jak je schematicky znázorněno na (Obr. 52). 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 přemístování vzorků. V době, kdy vzorky dosáhly relativní vlhkosti 95 %, byl proces zvlhčování ukončen. Poslední fáze experimentu spočívala ve vysušení vzorků pomocí mikrovlnného záření EMW.

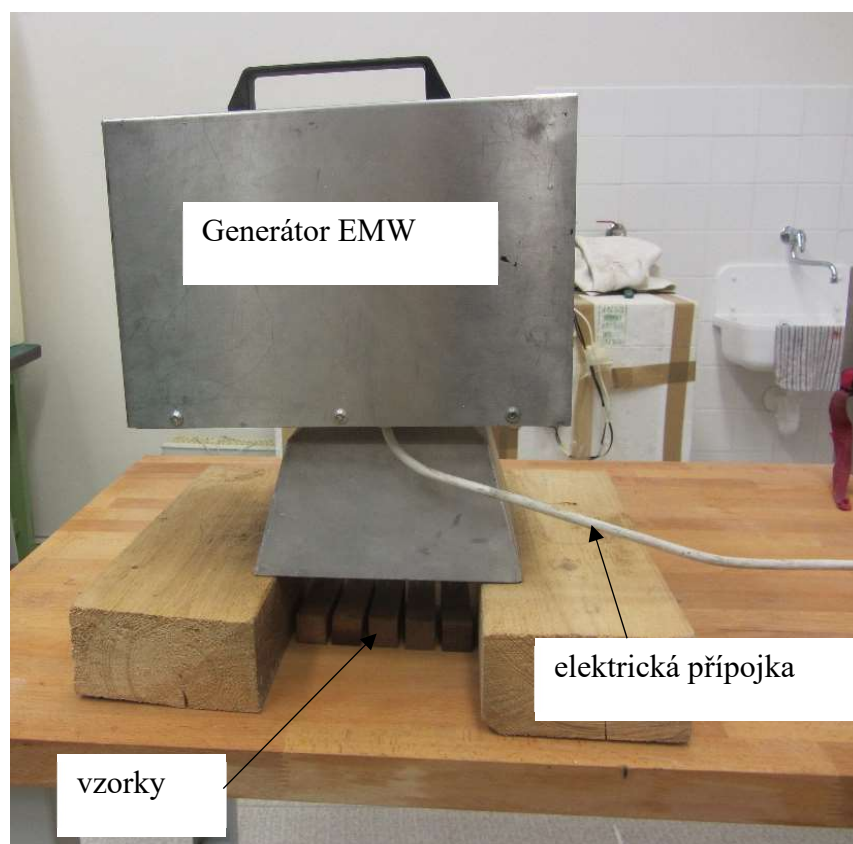


Obr. 52: Zvlhčovací nádoba.

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.

Pro experiment byl použit přenosný generátor mikrovlnného záření Romill G1/2011 zobrazený na (Obr. 43 a), (Obr. 43 b) a na (Obr. 53). Fotografie z reálného měření je zobrazena na (Obr. 53). Generátor Romill se umístil anténou dolů, kde byly přímo pod anténu vloženy vzorky

pro vysoušení. Pro docílení možnosti vkládat vzorky pod generátor došlo k podložení antény, tak jak je zaznamenáno na (Obr. 53).



Obr. 53: Průběh experimentu vysoušením EMW.

## 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 [80], 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 [80]. Podprogram DFLUX definuje tok vlhkosti na povrchu dřeva. Podprogram UMAT umožňuje implementaci reologického modelu dřeva. Vývojový diagram modelování a proces analýzy je znázorněn na (Obr. 54).

### D.3.1 Modelování pomocí ABAQUS

Z (Obr. 54) vyplývá, že si uživatel definuje geometrii, okrajové podmínky, vlastnosti materiálu zatížení a síť konečných prvků. Použitím následujících kroků je možné vytvořit model dřevěné konstrukce:

#### 1) Vytvoření modelu

V této části se nadefinují rozměry numerického modelu v případě, že se jedná o lepený profil, tak je doporučeno vytvořit celý profil a následně jej rozdělit na jednotlivé lamely. Tím je zabráněno nespojitosti výsledků na hranách lamel [80].

#### 2) Zadání vlastností

Zde se vytvoří tolik materiálových sekcí, kolik je potřeba na vytvoření modelu. Není potřeba zadávat všechny materiálové konstanty přímo v prostředí CAE, tyto konstanty lze zadat až do vstupního souboru. Tento postup urychluje práci se zadáváním konstant. Následně se ke každé sekci přiřadí materiál pro odpovídající část. Definují se lokální souřadnicové systémy. Pro modely ze dřeva je vhodné použít cylindrický souřadný systém. Počet lokálních souřadnicových systémů musí odpovídat počtu dřevěných vzorků, které se následně přiřadí ke každé materiálové sekci.

#### 3) Část sestavení modelu

Nyní se definuje poloha jednotlivých částí materiálů v modelu.

#### 4) Část pole

Zde se vytvoří tolik výpočetních kroků, kolik je potřeba pro zatěžovací stavy. Dále se vybírá druh analýzy. S ohledem na to, že je tepelný přenos a přenos vlhkosti analogický, tak lze vybrat analýzu spojeného teplotního posunu. V tomto kroku se nastavuje časové období kroku, ve kterém se definuje jak dlouho bude simulace probíhat a po jakém kroku bude výpočet probíhat.

Dále se zde nastavuje pole výstupu pro zvolené veličiny s požadovanou frekvencí ukládání výsledků.

#### 5) Zadání zatížení

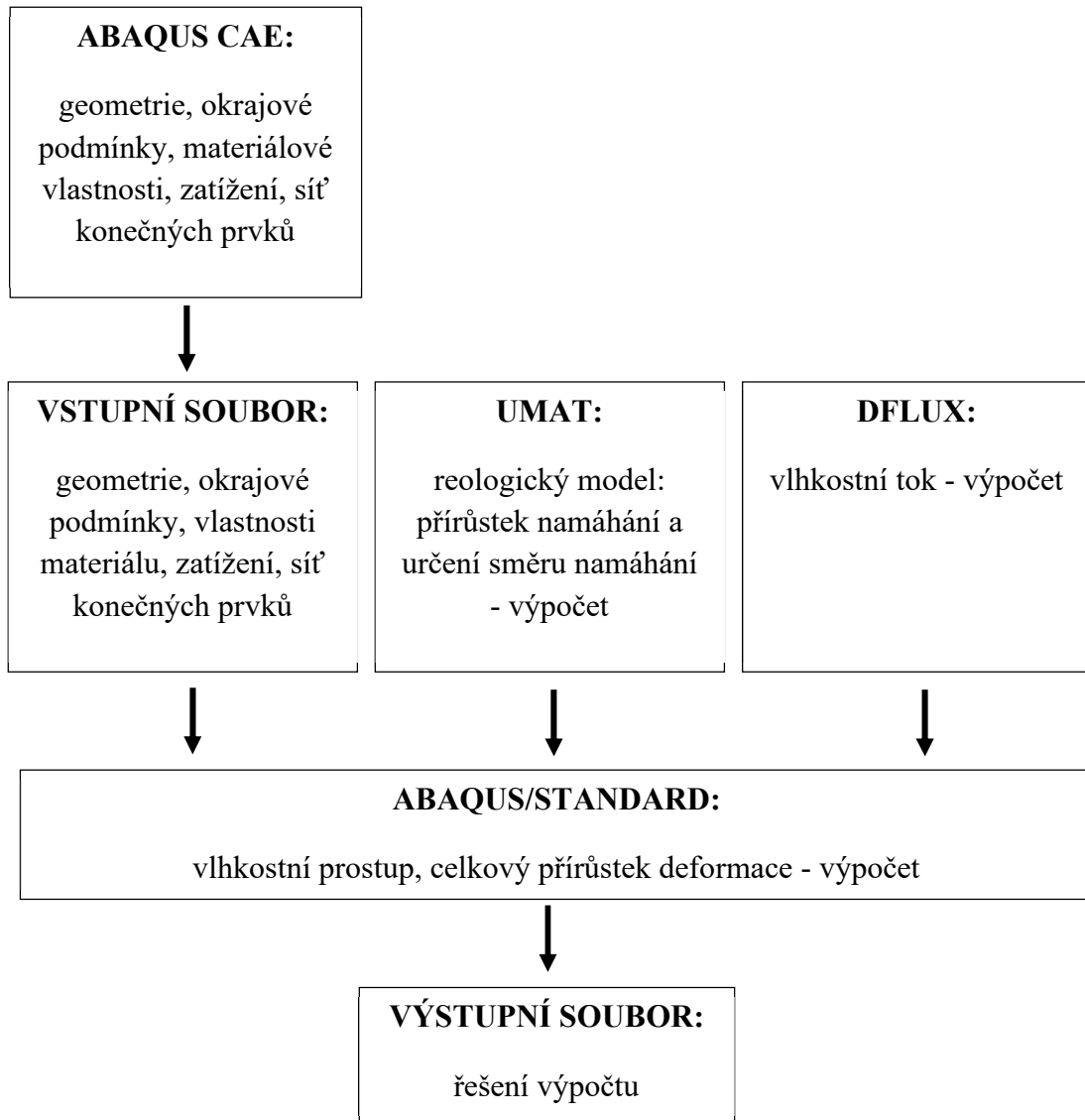
V této fázi lze zadat počáteční vlhkost vzorku, lze zadat různá počáteční vlhkost pro různé části vzorku. Lze přidat zatížení ve formě osamělé síly, momentu nebo spojitého zatížení. Pro aktivaci podprogramu DFLUX je zapotřebí vybrat tepelné zatížení a povrchový tepelný tok, kde se nastaví velikost zatížení na hodnotu 1,0.

#### 6) Vytvoření sítě konečných prvků

Při generaci sítě konečných prvků je vhodné používat elementy ve tvaru kvádrů. ABAQUS obsahuje spoustu různých elementů, které mají různé tvary a hodí na pro odlišné simulace [1]. Pro teplotně potažmo vlhkostní simulace je vhodné použít element C3D8T, což je 8 bodový element ve tvaru lineárního šestihranu.

#### 7) Vytvoření závěrečné práce

Tato fáze vytvoří vstupní soubor, ve kterém jsou uloženy všechny předchozí kroky v postupném sledu v jakém byly vytvořeny. Tento soubor následně vstupuje do výpočtu numerické simulace.



Obr. 54: Schéma výpočtu modulu dřeva v ABAQUS. Převzato z [80] a upraveno.

### D.3.2 Podprogramy v programu ABAQUS

Podprogramy slouží jako nezávislé algoritmy, které umožňují řešení složitějších operací. Jedná se o programy, které jsou naprogramovány v programovacím jazyku FORTRAN [80], ve kterém je naprogramováno i jádro programu ABAQUS. Existuje celá řada těchto podprogramů, které jsou vydávány i jako součást programu ABAQUS. Výhodou je možnost vytvoření si vlastního podprogramu, ve kterém si uživatel může nadefinovat své proměnné a vlastní výpočty. Další výhodou těchto podprogramů je, že je lze kombinovat [80].

### D.3.2.1 Podprogram DFLUX

Princip začleněný do výpočtu pomocí podprogramu DFLUX je založený na výpočtu rovnovážné vlhkosti, která se vypočítá dle vztahu (5). Po jejím určení se porovná původní hodnota rovnovážné vlhkosti s vypočítanou, a dle vlhkosti okolí se určí, jakým směrem bude vlhkost postupovat. Látky se pohybují z míst z vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací, pohyb přestane, až se koncentrace vyrovnají. Matematicky je tento proces popsán vztahem (71) [117]. Jedná se o jiné vyjádření vztahu (48). Kde  $F$  je difúzní tok, který znamená, jaké množství látky projde za jednotku času jednotkovou plochou,  $\mathbf{D}$  je difúzní koeficient s jednotkou,  $c$  je koncentrace procházející látky a  $x$  je vzdálenost. Záporné znaménko je z důvodů opačné difúze než směr stoupající koncentrace. Tento vztah je označován jako první Fickův zákon.

$$F = -\mathbf{D}_c \frac{\partial c}{\partial x} \quad (71)$$

V průběhu difúze dochází ke snížení gradientu, což znamená že musíme použít funkci, která je popsána v trojrozměrném prostoru a čase. Obsahuje tedy složky  $c(x, y, z, t)$ . Jedná se o podmínku hmotné bilance, která se přidá k prvnímu Fickovu zákonu a vznikne nám vztah (72) [117] nebo jinak zapsaná rovnice (51), který je nazýván druhý Fickův zákon.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \mathbf{D}_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (72)$$

Difúze se počítá na každé hraně všech elementů v každém časovém kroku simulace. Výpočet je upraven o další vstupní údaje, kterým je například emisivita povrchu. Pro simulaci byla využita hodnoty emisního koeficientu,  $1,28 \cdot 10^{-7}$  podle Torattiho [116]. Další proměnnou, která vstupuje do výpočtu je difúzní křivka. Jako nejvhodnější difúzní křivka byla zvolena křivka Nilsson & Sandberg [87], která je definována do 80 % vlhkosti dřeva. Tato hodnota byla dostatečnou pro celý průběh výpočtu.

Relativní vlhkost může být definována dvěma způsoby. První způsob je použití skutečně naměřených meteorologických dat za pomoci meteorologické stanice. Při souboru dat vytvořených z reálných měření je vyšší pravděpodobnost nestability výpočtu hlavně při rychlých a velkých výkyvech počasí. Tyto výkyvy lze zmírnit tím, že se bude počasí zaznamenávat po kratším časovém úseku. Druhou možností je použití statistického počasí, které je založeno na definici funkce sinus. O vytvoření statistického počasí je více psáno v kapitole D.4.

#### D.3.2.2 Podprogram UMAT

Podprogram UMAT slouží k definici materiálu, na kterém probíhá simulace. Tento podprogram byl z původního rozšířen o více konstant, které jsou potřeba pro výpočty s použitím dřeva. V tomto podprogramu lze definovat mechanicko-konstrukční chování, hodnoty napětí a další proměnné musí být definovány v Jacobiho matici uvedené jako vztah (73) [80], kde  $\sigma$  je napětí a  $\varepsilon$  je deformace. Pro správné výsledky za použití dřeva je potřeba proměnné měnit v každém kroku iterace.

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \varepsilon} \quad (73)$$

## D.3.2.3 Vstupní data pro výpočet v programu ABAQUS

Na (Obr. 55) je uvedena část vstupních dat sloužící pro výpočet v programu ABAQUS. Tato část slouží k definování materiálového modelu.

```

** MATERIALS
**
*Material, name=WOOD
*Conductivity, type=ORTHO
3.89921e-05, 3.89921e-05, 0.000135471, 0.
4.35864e-05, 4.35864e-05, 0.000151963, 0.027586
5.91361e-05, 5.91361e-05, 0.000206152, 0.055172
8.61126e-05, 8.61126e-05, 0.000300393, 0.082759
0.000140183, 0.000140183, 0.000487696, 0.110345
0.000332199, 0.000332199, 0.00115798, 0.137931
0.000527749, 0.000527749, 0.0018377, 0.165517
0.000578403, 0.000578403, 0.0020144, 0.193103
0.000585471, 0.000585471, 0.00203796, 0.22069
0.000564267, 0.000564267, 0.00196728, 0.248276
0.000518325, 0.000518325, 0.00180353, 0.275862
*Density
450.,
*Depvar
146,
*Specific Heat
1.,
*User Material, constants=39
6e+08, 6e+08, 1.2e+10, 0.558, 0.038, 0.015,
4e+07, 7e+08
7e+08, 0.13, 0.27, 0.005, 450., 20.,
0.158587, 450.
20., 0.12, 0.0003, -0.007, -2.6, 2.4,
0.085, 24.
0.035, 240., 0.07, 2400., 0.2, 0.01,
6e-10, 0.05
0.1, 6e-10, 0.7, 1., 5e-09, 0.25,
6.6e-08
    
```

Deklarace difúzního modelu

Deklarace materiálových konstant

Obr. 55: Ukázka části vstupních dat. Nastavení materiálového modelu.

Na (Obr. 55) je zeleným obdélníkem označena část, která slouží pro nastavení difúzního modelu. První sloupec obsahuje hodnoty pro difúzi v radiálním směru, druhý sloupec jsou hodnoty ve směru tangenciálním, třetí sloupec je směr podélný a poslední čtvrtý sloupec obsahuje tomu odpovídající vlhkost vzorku.

Modrý obdélník na (Obr. 55) obsahuje celkem 39 uživatelsky nastavitelných materiálových konstant. Jedná se o materiálové konstanty odpovídající smrkovému dřevu. Přehlednější zobrazení je uvedeno v (Tab. 11), kdejsou pro porovnání uvedeny hodnoty i pro borovici.

Tab. 11: Materiálové vlastnosti používané při analýze. Převzato a přeloženo z [80].

Číslo	Symbol	Význam	Hodnota pro smrk	Hodnota pro borovici	Jednotka
1	$E_r,ref$	Referenční moduly elasticity	600	900	MPa
2	$E_t,ref$		600	500	MPa
3	$E_z,ref$		12 000	12 000	MPa
4	$\nu_{rt}$	Poissonův koeficient	0,558	0,558	-
5	$\nu_{rz}$		0,038	0,038	-
6	$\nu_{tz}$		0,015	0,015	-
7	$G_{rt,ref}$	Referenční moduly smyku	40	40	MPa
8	$G_{rz,ref}$		700	700	MPa
9	$G_{tz,ref}$		700	700	MPa
10	$\alpha_{u,r}$	Koeficient vlhkostní expanze	0,13	0,13	-
11	$\alpha_{u,t}$		0,27	0,27	-
12	$\alpha_{u,z}$		0,005	0,005	-
13	$\rho_0$	Hustota při počáteční vlhkosti	450	550	kg/m <sup>3</sup>
14	$T_0$	Počáteční teplota	20	20	°C
15	$u_0$	Počáteční obsah vlhkosti			-
16	$\rho_{ref}$	Referenční hustota	450	550	kg/m <sup>3</sup>
17	$T_{ref}$	Referenční teplota	20	20	°C
18	$u_{ref}$	Referenční obsah vlhkosti	0,2	0,2	-
19	$a_1$	Koeficient související s hustotou	0,0003	0,0003	m <sup>3</sup> /kg
20	$b_1$	Koeficient související s teplotou	-0,007	-0,007	1/°C
21	$c_1$	Koeficient související s obsahem vlhkosti	-2,6	-2,6	-
22	$\tau_1^{ve}$	Zpomalující viskoelastický prvek 1	2,4	2,4	h
23	$J_1^{ve}$	Viskoelastická poddajnost prvku 1	0,085	0,085	-
24	$\tau_2^{ve}$		24	24	h
25	$J_2^{ve}$		0,035	0,035	-
26	$\tau_3^{ve}$		240	240	h
27	$J_3^{ve}$		0,07	0,07	-
28	$\tau_4^{ve}$		2400	2400	h
29	$J_4^{ve}$		0,2	0,2	-
30	$\tau_1^{ms}$	Zpomalující mechanosorptivní prvek 1	0,01	0,01	-
31	$J_1^{ms,T}$	Mechanosorptivní poddajnost prvku 1 v tangenciálním směru	0,003	0,003	1/MPa
32	$J_1^{ms,Z}$	Mechanosorptivní poddajnost prvku 1 v podélném směru daný jako faktor elastické poddajnosti	0,035	0,035	-
33	$\tau_2^{ms}$		0,1	0,1	-
34	$J_2^{ms,T}$		0,003	0,003	1/MPa
35	$J_2^{ms,Z}$		0,49	0,49	-
36	$\tau_3^{ms}$		1	1	-
37	$J_3^{ms,T}$		0,07	0,07	1/MPa
38	$J_3^{ms,Z}$		0,25	0,25	-
39	$m_v$	Koeficient pro nenávratnou část mechanosorptivní tečení	0,33	0,33	1/MPa

## D.4 Okrajové podmínky

Vstupy do numerických výpočtů jsou okrajové podmínky, tj. např. vliv počasí. Pro případ, že není v dostatečné blízkosti dostupná meteorologická stanice, tak lze použít postup spočívající k získání tzv. statistického počasí. Tento model lze následně použít také jako predikce, jak se vzorek bude chovat v budoucnosti.

Pro co nejpřesnější statistiku a vytvoření běžného počasí je potřeba znát historii počasí co možná nejdéle zpětně. Webová databáze ECMWF [36] má několik poddatabází, ve kterých jsou ukládána různá meteorologická data. Databáze ERA [39] má první data uložená od 1. 1. 1979. Tyto meteorologické informace se ukládají v 6 hodinových cyklech.

Z databáze ERA byly staženy data o teplotě, měřené ve výšce 2 metrů nad zemí a informace o relativní vlhkosti vzduchu.

Experiment měl dokázat jak se bude chovat nezastřešený dřevěný most, který se nachází v jižním Finsku mezi městy Lahti a Mikkeli na silnici č. 5. Most překlenuje jezero Lahnavesi. Více informací o tomto dřevěném mostě je uvedeno v kapitole G.2.

Pro určení, ze které části mají být klimatická data generována, bylo využito GPS souřadnic. Tento postup byl vybrán jako nejpřesnější určení zkoumaného místa. Použité GPS souřadnice v databázi byly  $61,440387^\circ$  N a  $26,676570^\circ$  E, tyto souřadnice byly staženy z google maps a zkontrolovány při místní kontrole.

Počasí se z dlouhodobého pozorování chová periodicky jak je uvedeno například ve zdroji [76] a lze použít goniometrické funkce. Nejvhodnější funkce pro tento případ jsou sinus nebo cosinus.

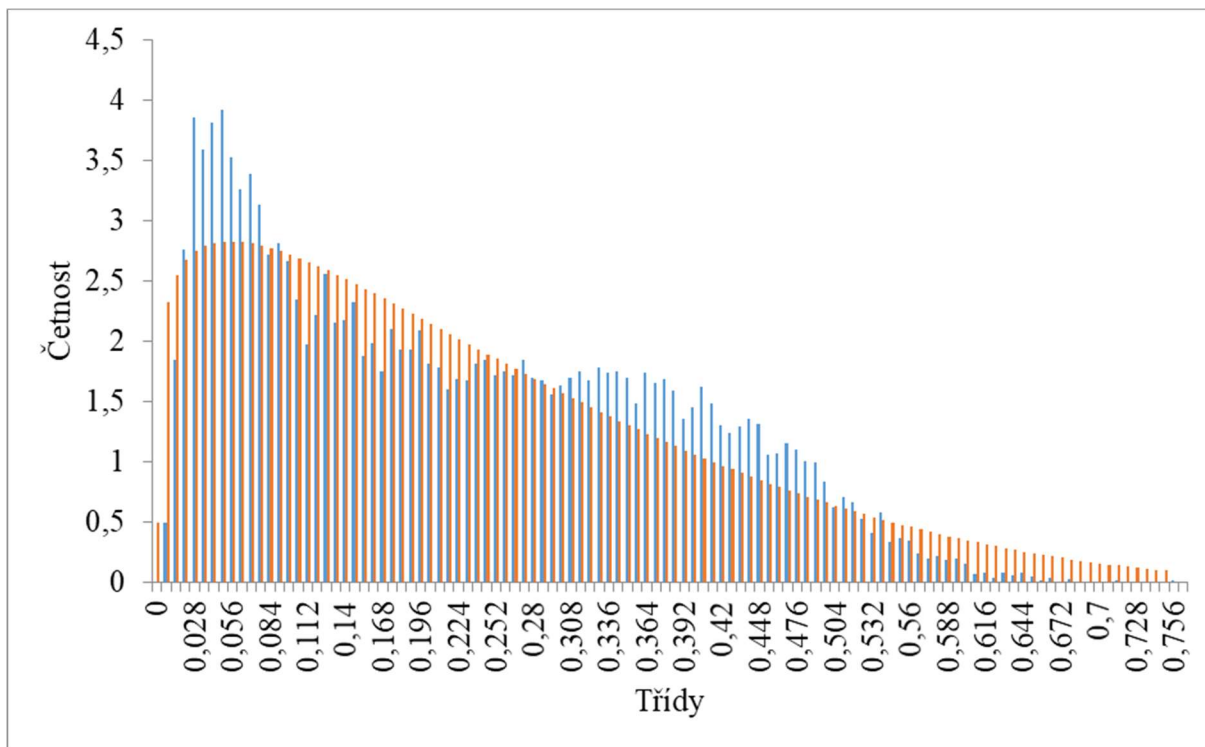
Postup výpočtů lze rozdělit na dvě části. První část se zabývá výpočty s relativní vlhkostí a druhá část je tvořena výpočty s okolní teplotou.

Každý den obsahoval 4 uložené hodnoty a to v 0:00, 6:00, 12:00 a 18:00. Z těchto hodnot bylo určeno minimum a maximum. Dále následovalo určení rozdílu maxima a minima. Tyto hodnoty sloužily k vytvoření histogramu a dalšímu statistickému zpracování. Statistické zpracování probíhalo dle [115] a byla dodržena také stejná rozdělení, aby bylo možné výsledky porovnat. Zvolené rozdělení bylo Beta, které je označováno dle vztahu (74) [101], [120], s parametry (75) [101].

$$X \sim B(\alpha, \beta) \tag{74}$$

$$\alpha, \beta > 0 \tag{75}$$

Výsledné rozdělení je vidět na (Obr. 56). Jedná se o histogram, který je vytvořený z rozdílů vlhkostí na ose  $x$  a procentuální četnosti na ose  $y$ . Modré sloupce znázorňují hodnoty pro skutečné počasí, oranžové označují statistické hodnoty beta rozdělení pro denní hodnoty.

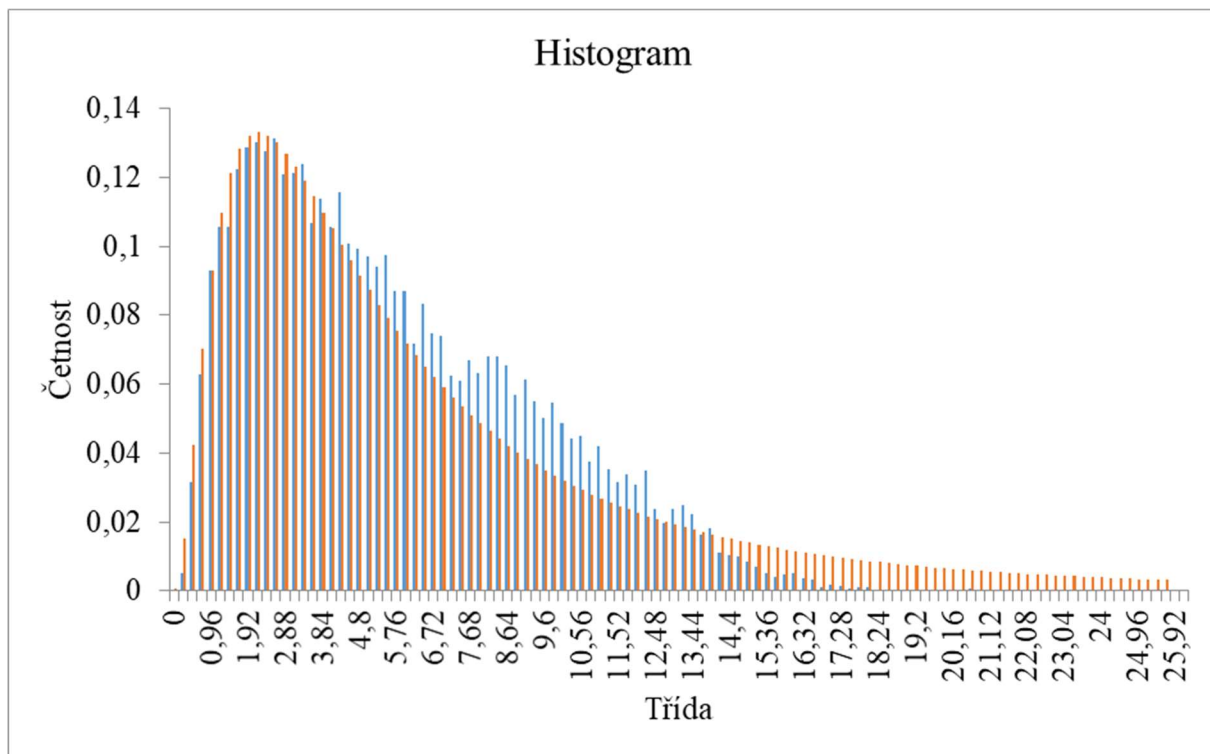


Obr. 56: Histogram  $\beta$  rozdělení z dat pro výpočet relativní vlhkosti.

Stejný postup byl aplikován na data s teplotními údaji. Na (Obr. 57) je vidět výsledný histogram ze statistických hodnot beta rozdělení. Oranžové sloupce jsou statisticky vypočítané hodnoty a modré sloupce popisují skutečně naměřené hodnoty.

Z (Obr. 56) a (Obr. 57) je vidět dostatečná přesnost zvolené statistické metody a lze tedy konstatovat, že použitá data pro vytvoření statistické relativní vlhkosti a teploty pro danou lokalitu budou velice přesné.

Data byly podkladem pro další numerické vyhodnocení. Pro statistické zpracování byly použity 5 % a 95 % kvantily. K vytvoření statistického roku byly na zahraniční stáži ve Finsku v rámci projektu Durable Timber Bridges odvozeny následující vztahy z goniometrických funkcí. Vztah (76) byl upraven ze vztahu nalezeného ve zdroji [101]. Vztahy (77) - (80) se použijí na stanovení potřebných neznámých do vztahu (76), který slouží ke stanovení statistické relativní vlhkosti, a vztah (81) slouží ke stanovení statistické teploty.


 Obr. 57: Histogram  $\beta$  rozdělení z dat pro výpočet teploty.

$$w = M_Y + A_Y^{95} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{8766}\right) + A_D^{95} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right), \quad (76)$$

$$A_Y^{95} = \frac{1}{2}(F_Y^{95} - 2A_D), \quad (77)$$

$$A_D = M_{AD}^{95} - A_{AD}^{95}, \quad (78)$$

$$A_D^{95} = \frac{1}{4}(F_D^{95} - F_D^{05}), \quad (79)$$

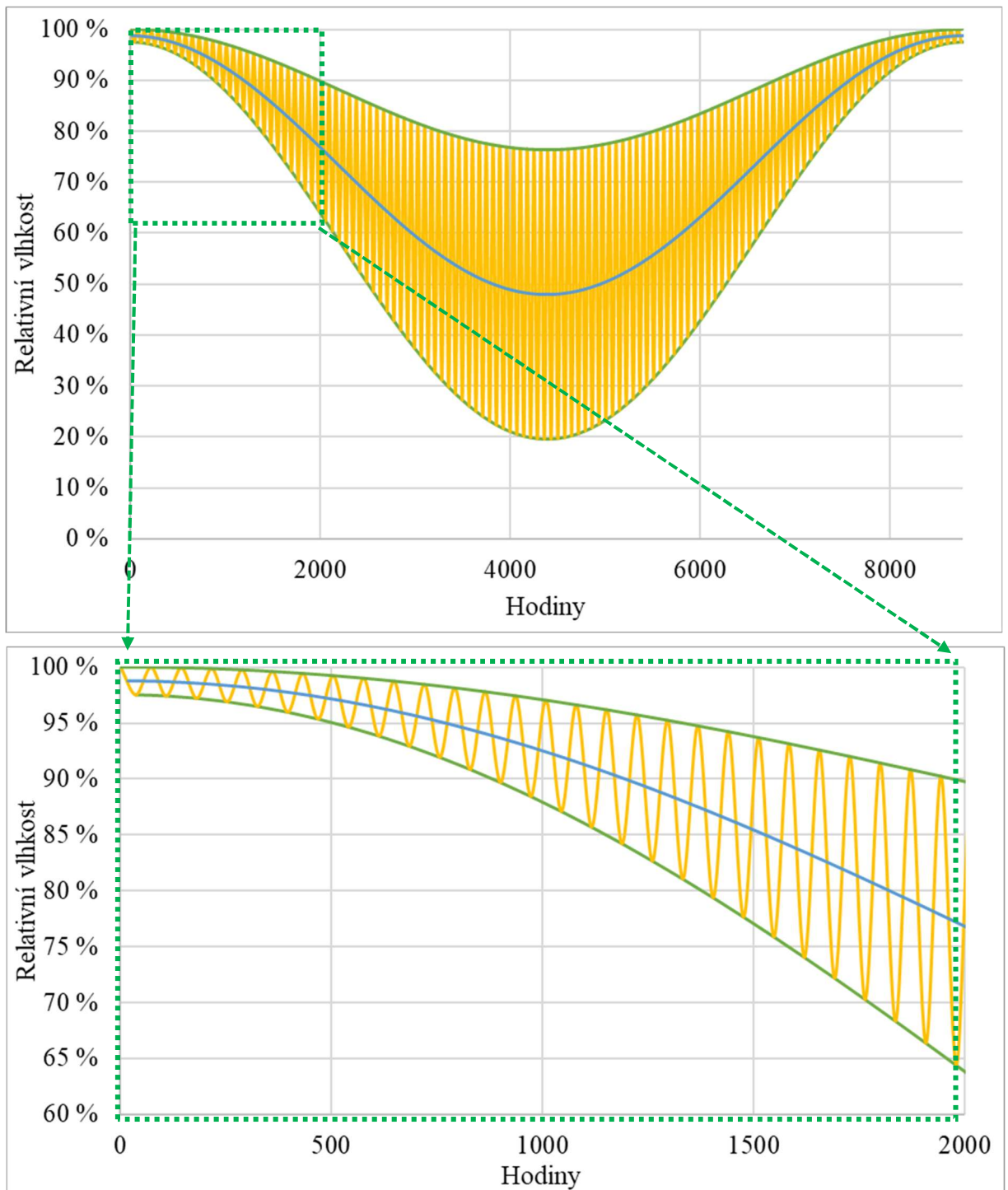
$$M_{AD}^{95} = \frac{1}{4}(F_D^{95} + F_D^{05}), \quad (80)$$

$$T = M_Y - A_Y^{95} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{8766}\right) - A_D^{95} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right), \quad (81)$$

kde označení  $M$  udává průměrné hodnoty,  $A$  označuje amplitudy a  $F$  udává rozkmit funkce. Spodní index  $_y$  označuje roční hodnoty, spodní index  $_D$  denní hodnoty. Horní index  $^{05}$  a  $^{95}$  označují 5% a 95% kvantily. Jmenovatel 8766 ve vztahu (76) a (81) označuje počet hodin v roce, který byl uvažován dlouhý 365,25 dne. Tato délka byla zvolena na základě [38], kde je uvedeno, že tato hodnota vychází z tropického roku a nejpřesněji odpovídá roku.

Ze vztahů (76) a (81) lze získat potřebná data pro stanovení statistického roku, který lze ve výpočtech aplikovat jako předpověď počasí a lze např. namodelovat chování konstrukce

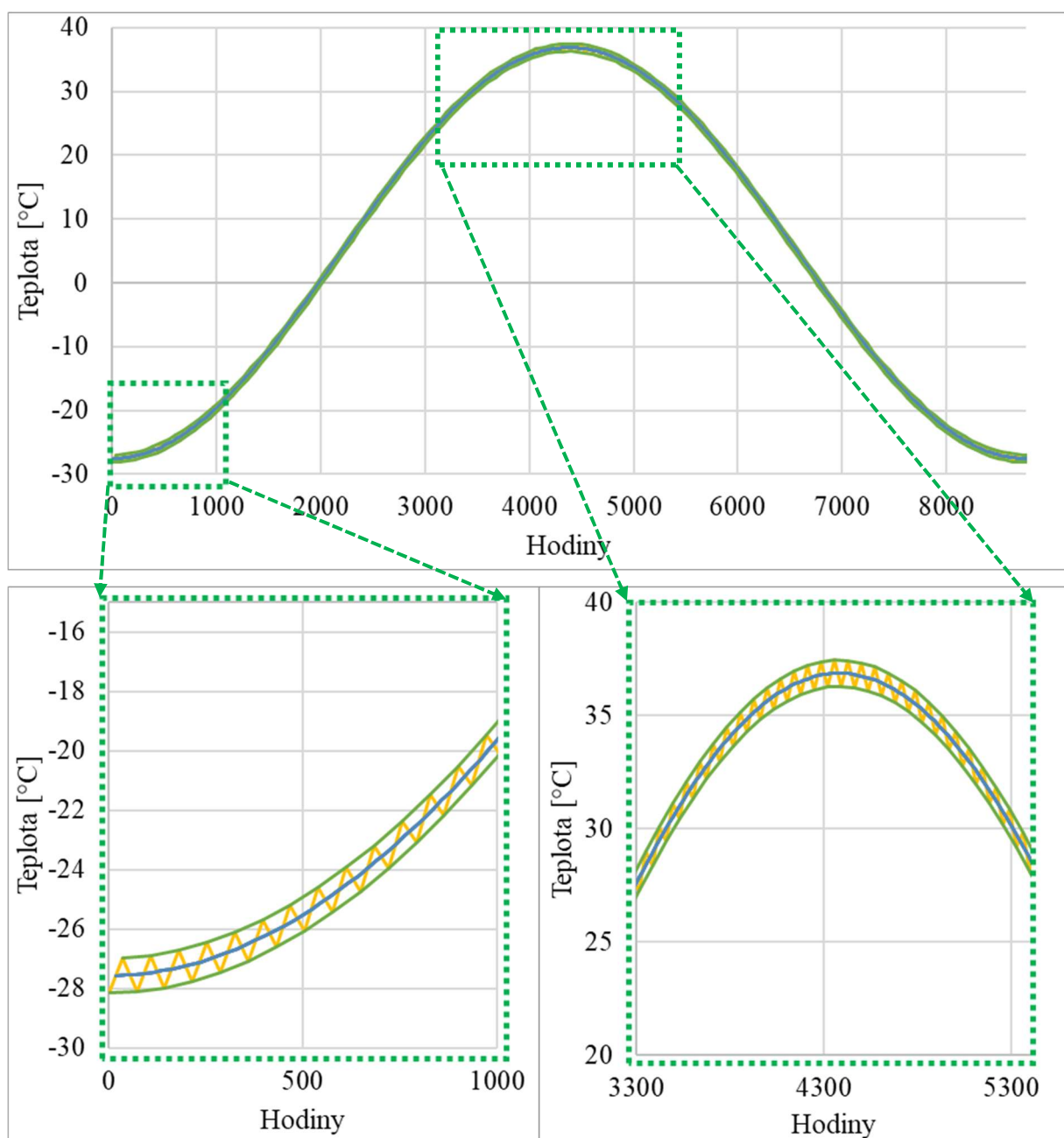
v budoucnu. Případně těmito daty nahradit data, která nebyla zaznamenána z meteorologické stanice např. v době výpadku záznamového nařízení.



Obr. 58: Graf průběhu relativní vlhkosti pro statistický rok.

Na (Obr. 58) je zobrazena relativní vlhkost a na (Obr. 59) je graf zobrazující průběh teploty. Minimum a maximum funkce je zobrazeno na (Obr. 58) a (Obr. 59) zelenou barvou. Modrá barva zobrazuje střední hodnoty. Žlutá barva zobrazuje denní rozkmity. Na (Obr. 58) je rozkmit velice dobře patrný a to hlavně ve střední části, která odpovídá letním měsícům.

Oba grafy mají počátek 1. ledna, kdy byl předpoklad nejnižší okolní teploty a tomu odpovídající nejvyšší vlhkosti. Tento stav nemusí přesně odpovídat všem podnebním pásům na světě. V místech experimentu a to Finsku toto nastavení počátku opovídalo zkoumání.

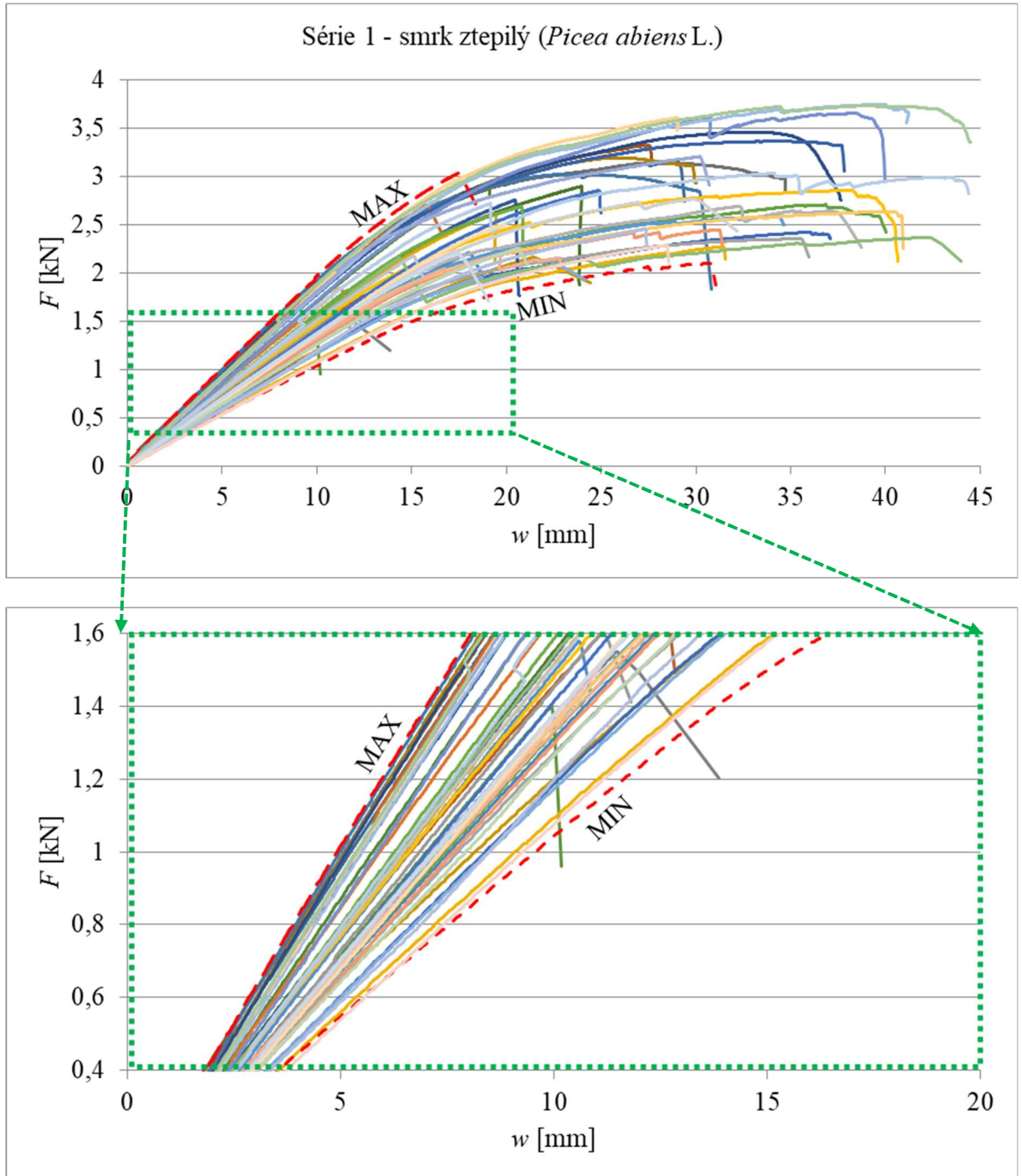


Obr. 59: Graf průběhu teploty pro statistický rok.

## E VÝSLEDKY A DISKUZE

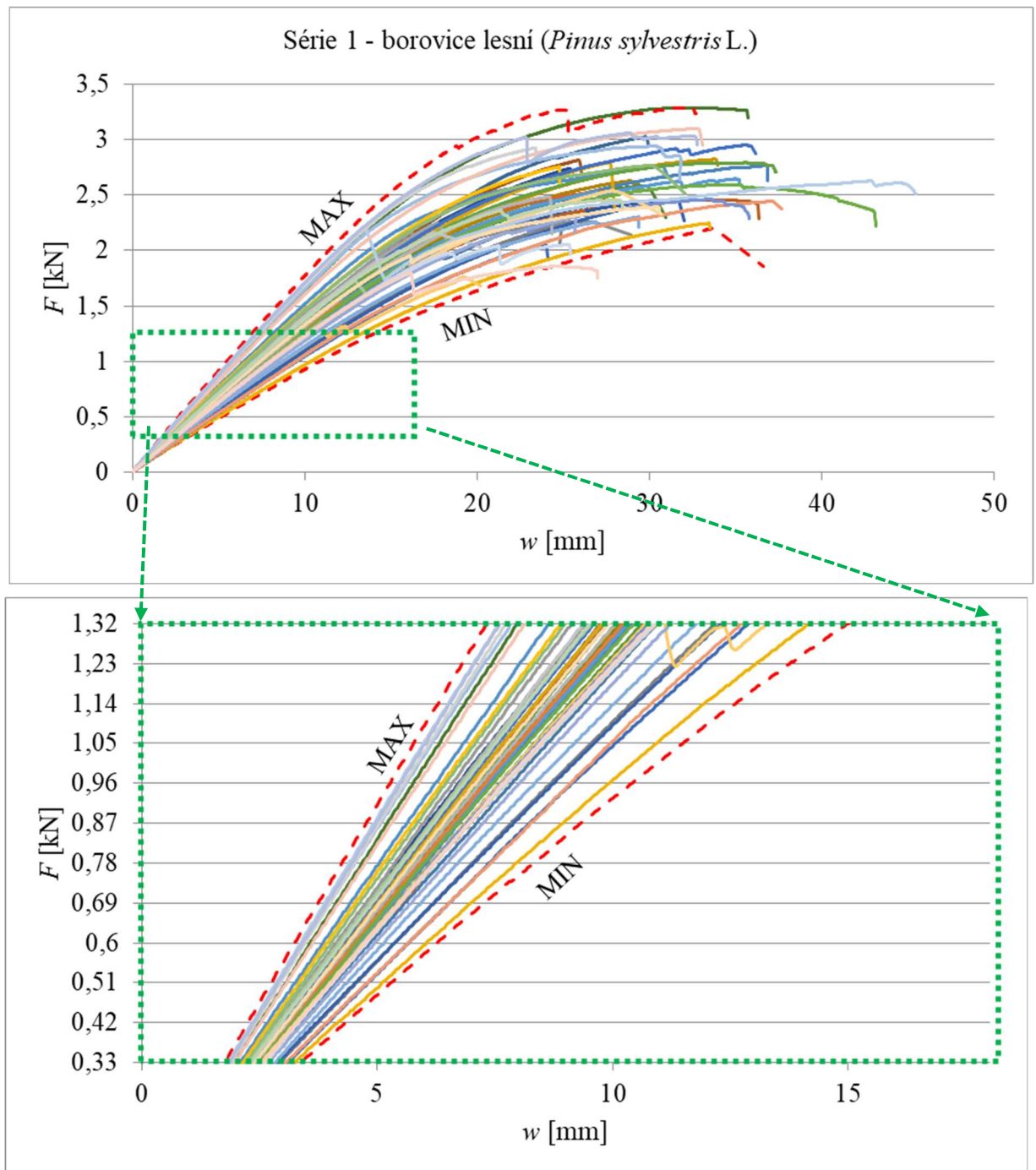
### E.1 Výsledky a vyhodnocení experimentu EX1

#### E.1.1 Dráha zatížení pro testování série 1 – smrk ztepilý



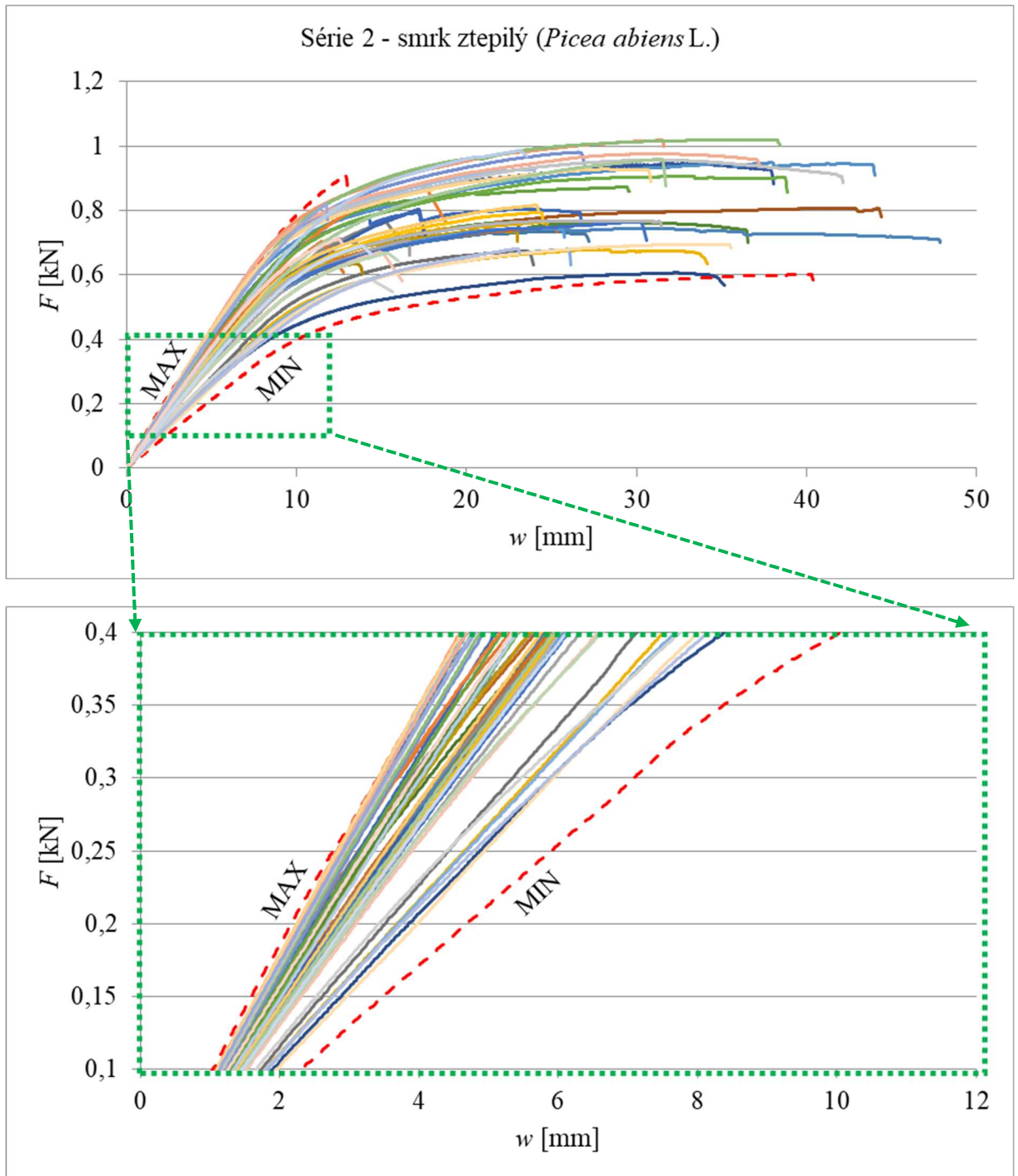
Obr. 60: Série 1 smrk ztepilý (*Picea abies* L.).

E.1.2 Dráha zatížení pro testování série 1 – borovice lesní



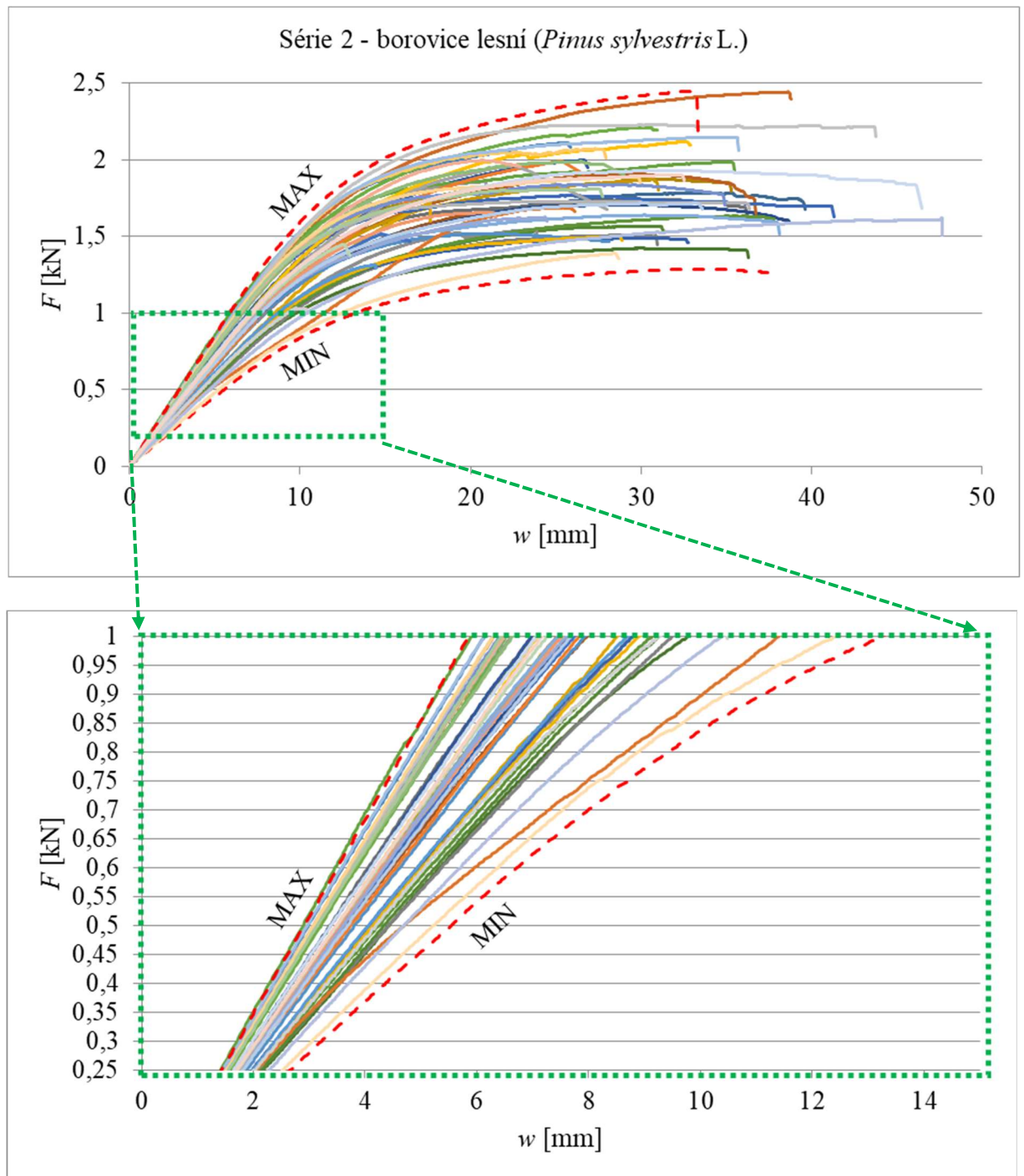
Obr. 61: Série 1 borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

E.1.3 Dráha zatížení pro testování série 2 – smrk ztepilý



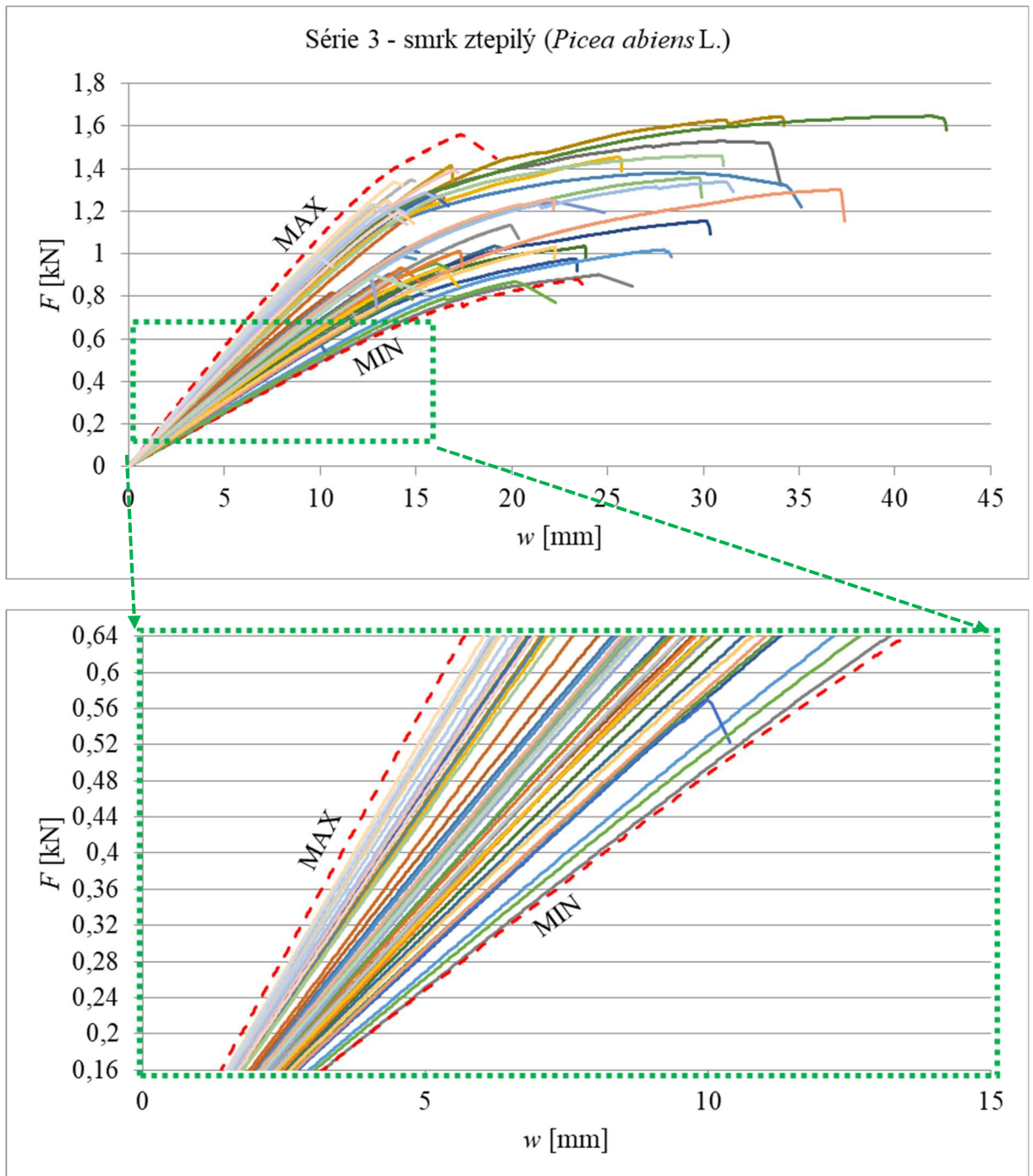
Obr. 62: Série 2 smrk ztepilý (*Picea abies* L.).

E.1.4 Dráha zatížení pro testování série 2 – borovice lesní



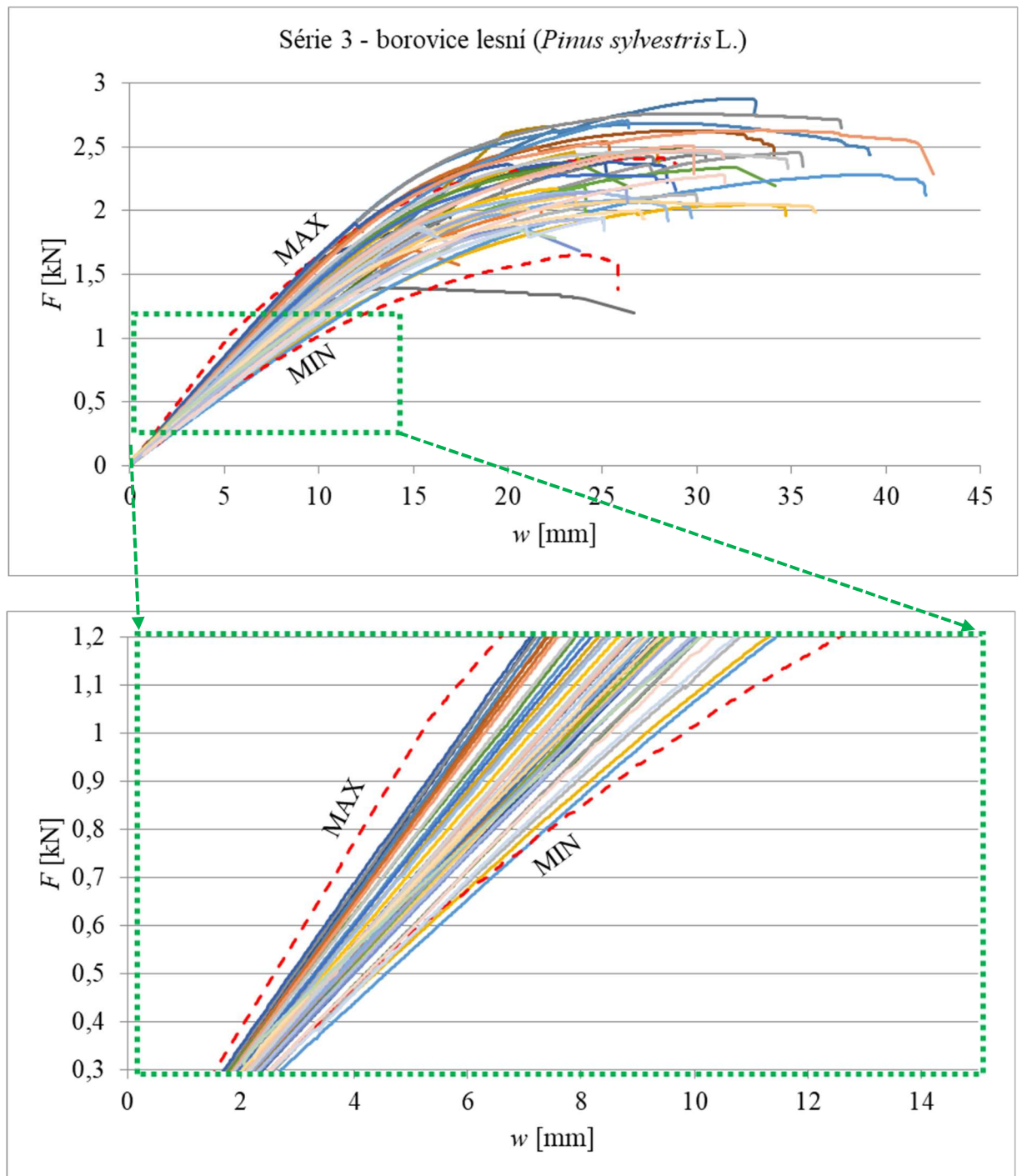
Obr. 63: Série 2 borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

E.1.5 Dráha zatížení pro testování série 3 – smrk ztepilý



Obr. 64: Série 3 smrk ztepilý (*Picea abies* L.).

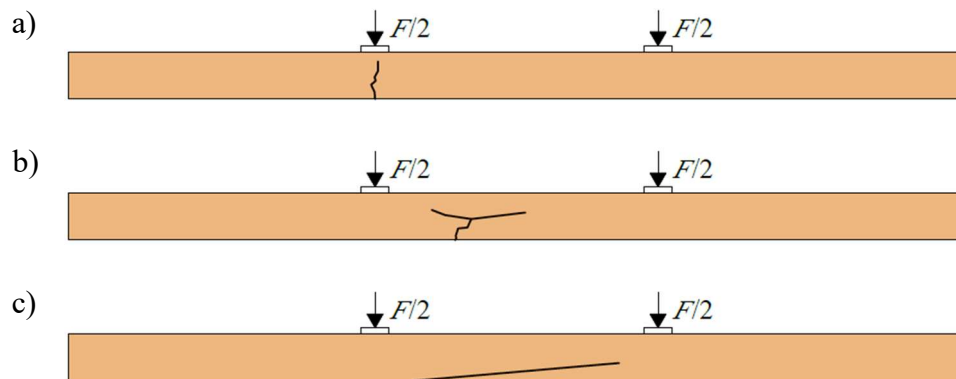
E.1.6 Dráha zatížení pro testování série 3 – borovice lesní



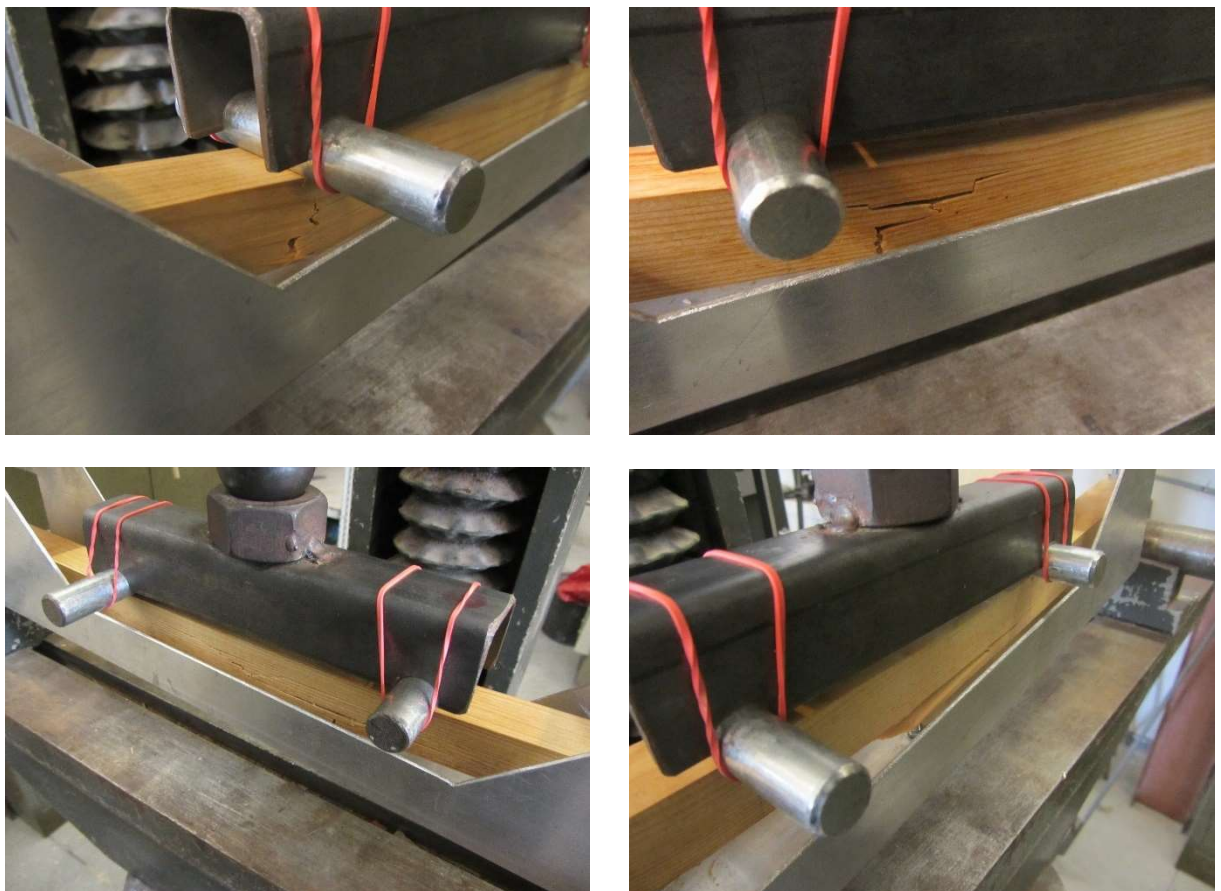
Obr. 65: Série 3 borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

### E.1.7 Druhy porušení při čtyřbodovém ohybu

Testy se prováděly až do porušení vzorku. Nejčastější typy a způsoby porušení pod působícími břemeny jsou zobrazené na (Obr. 66). Poškození (Obr. 66 a)) je v místě pod působícím břemenem. Poškození (Obr. 66 b)) a (Obr. 66 c)) je mezi břemeny v místě nejvyššího momentu, kdy u (Obr. 66 c)) je trhлина vytvořená rovnoběžně s vlákny. Tyto druhy poškození odpovídají např. [95]. Skutečné poškození z experimentu je zobrazeno na (Obr. 67).



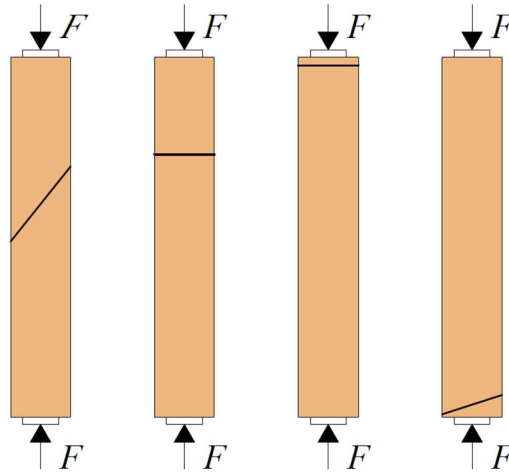
Obr. 66: Modely poškození při čtyřbodovém ohybu.



Obr. 67: Druhy poškození při testování pomocí čtyřbodového ohybu.

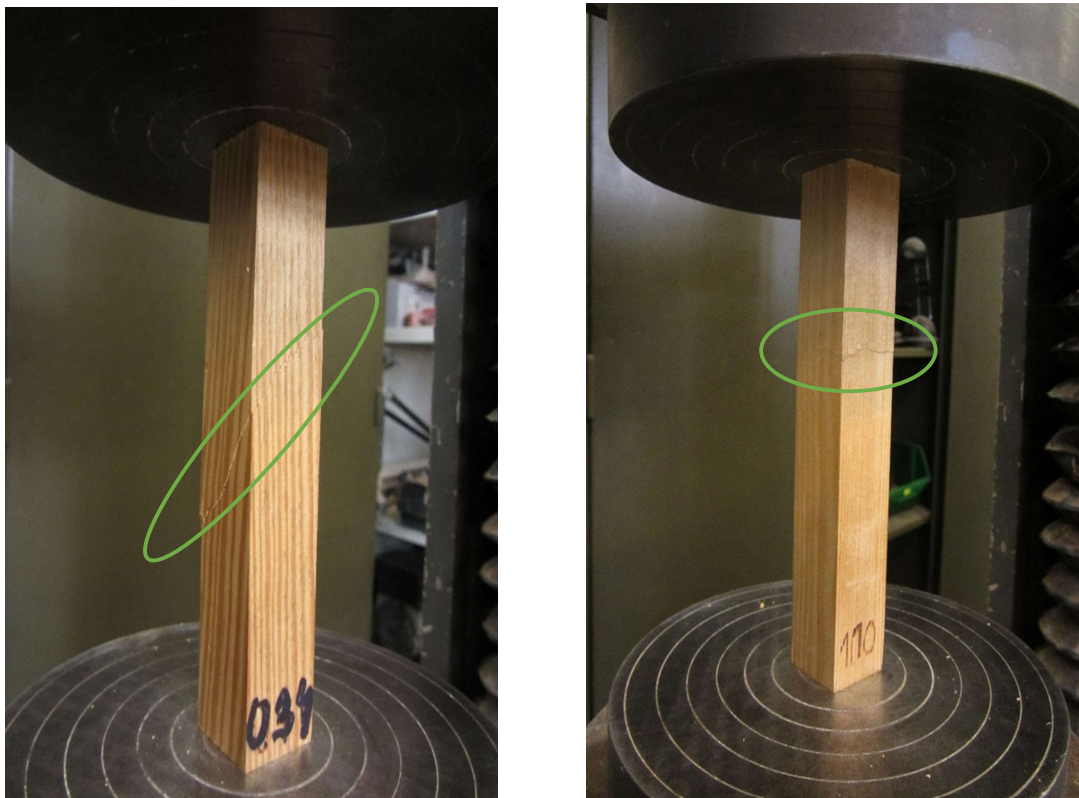
### E.1.8 Druhy porušení při tlakových zkouškách

Při testování tlaku rovnoběžně s vlákny docházelo nejčastěji k poškození které odpovídá (Obr. 68), který vychází ze [11] a [95].

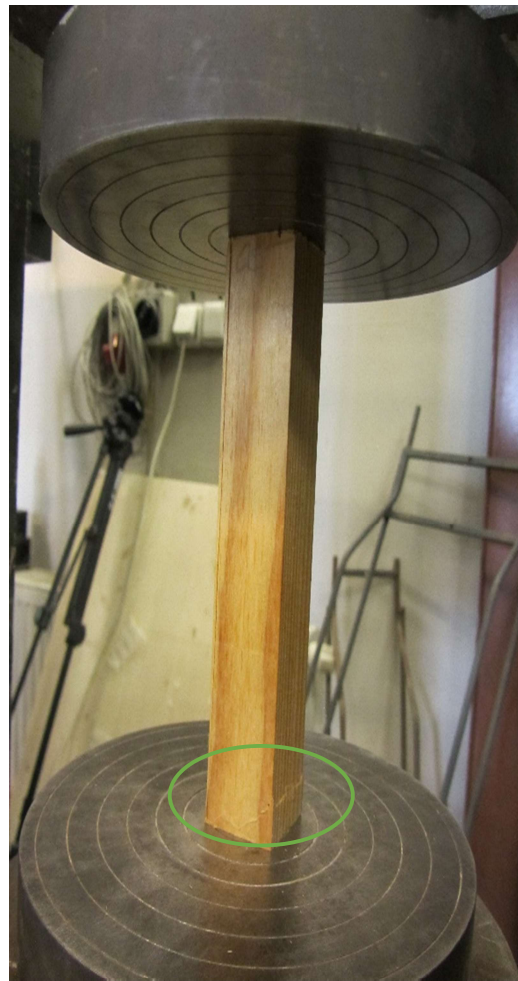
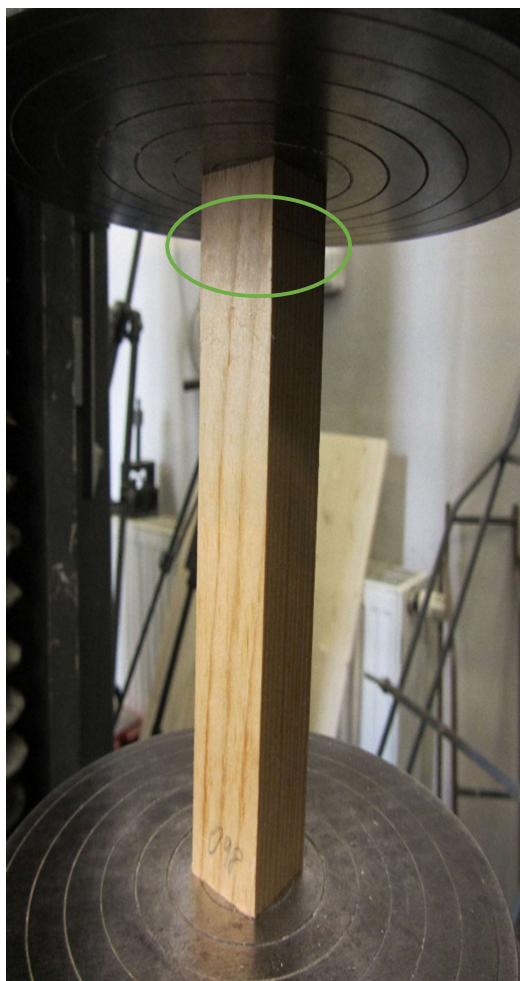


Obr. 68: Modely poškození při tlaku.

Nejčastěji došlo k poškození ve střední části vzorku, jak je vidět na (Obr. 69). Další poškození byla zaznamenána ve spodní nebo horní části vzorku patrné z (Obr. 70). Poškození je označeno zelenou elipsou pro snadnější orientaci.



Obr. 69: Poškození ve střední části vzorku.



Obr. 70: Poškození ve spodní nebo horní části.

## E.1.9 Výsledné hodnoty získané z experimentu EX1

V (Tab. 12) jsou přehledně zapsány všechny naměřené a vypočítané hodnoty, které byly stanoveny z mechanických zkoušek.

Tab. 12: 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.1.10 Výsledky zkoušky pro čtyřbodový ohyb

Změřené a statisticky vyhodnocené výsledky z experimentu EX1 jsou přehledně uvedeny v (Tab. 12). Sloupce A, B a C jsou pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) a sloupce D, E a F jsou pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Pro každou sérii z experimentálního měření byly sestaveny grafy, které jsou uvedeny na (Obr. 60) až (Obr. 65). Tyto grafy obsahují zatěžovací dráhy všech vzorků. Zatěžovací dráhy mají na vodorovné ose vynesena svislý posun  $w$  v [mm] a na svislé ose je vynesena odpovídající síla  $F$  v [kN]. Na (Obr. 60) až (Obr. 65) je zobrazená celá zatěžovací dráha, ze které je patrné jaké hodnoty byly použity pro odhad maximálního zatížení  $F_{max,est}$ . Toto největší zatížení je uvedené v (Tab. 12). Na (Obr. 60) až (Obr. 65) je dále naznačen výřez, který byl použitý pro regresní analýzu podle ČSN EN 408 (73 1741) [29].

#### E.1.10.1 Série 1

Zatěžovací dráha pro smrk ztepilý v sérii 1 je zobrazena na (Obr. 60), kde lze odvodit, že maximální naměřená síla před porušením je 3,73 kN. Pro borovici lesní v testování série 1 je zpracován (Obr. 61), ze kterého lze odečíst maximální naměřenou sílu před porušením 3,28 kN. Smrkové vzorky měly průměrnou vlhkost 9,04 % a borové vzorky dosáhly průměrné vlhkosti 10,78 %. Lze tedy konstatovat že celá série měla vlhkost mezi 9 – 11 % a lze hodnoty mezi sebou porovnávat.

Při porovnání průměrných MOE v sérii 1 je patrné z (Tab. 12), že výsledná hodnota pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.)  $E_{m,\emptyset} = 8,649$  GPa je vyšší než hodnota MOE borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), která má  $E_{m,\emptyset} = 7,660$  GPa. Porovnáním literatury lze zjistit, že borovice dosahuje vyšších hodnot MOE na úkor smrku a to dle [68]. Ovšem dle zdrojů [96] a [100] dosahuje smrk vyšší hodnoty než borovice. Diskuze nad rozdílnými hodnotami mezi literaturou a experimentem je popsána v samostatné kapitole (E.1.13 Diskuze nad výsledky experimentu EX1)

Pevnost v ohybu byla také vyhodnocena pro obě dřeviny. Vypočtené hodnoty průměrné, maximální i minimální pevnosti v ohybu a tomu odpovídající statistické hodnoty 5 % a 95 % kvantilu jsou uvedené v (Tab. 12). Hodnoty pro smrk jsou ve sloupci A, hodnoty pro borovici jsou ve sloupci D. Při porovnání s (Tab. 8) je MOR při vlhkosti 12 % pro smrk 80 MPa a pro borovice 86 MPa. Z experimentálního měření byly stanoveny hodnoty pro smrk  $f_{m,\emptyset} = 75,434$  MPa a pro borovici  $f_{m,\emptyset} = 72,042$  MPa. Dle [95] je pevnost v ohybu  $f_{m,\emptyset} = 75,9$  MPa. Lze tedy konstatovat, že při porovnání hodnot s experimentem provedeným ve zdroji [89] a experimentem EX1 je vysoká shoda stanovení pevnosti v ohybu.

Výsledné hodnoty pro zkoušky tlaku rovnoběžně s vlákny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 12) ve sloupci A pro smrk a ve sloupci D pro borovici. Průměrná hodnota tlaku rovnoběžně s vlákny pro smrk  $f_{c,0} = 43,856$  MPa a pro borovici  $f_{c,0} = 33,017$  MPa. Pro porovnání lze použít (Tab. 9), kde hodnota pro smrk je  $f_{c,0} = 44,4$  MPa a pro borovici je  $f_{c,0} = 48,5$  MPa. V případě srovnání se smrkovým dřevem je zjištěná hodnota velice podobná. Pro případ borovicového dřeva je znatelný větší rozdíl. Diskuze nad tímto rozdílem je popsána v samostatné kapitole (E.1.13 Diskuze nad výsledky experimentu EX1).

#### E.1.10.2 Série 2

Série 2 byla zvlhčena na vlhkost těsně pod hranici *BNV* jak je uvedeno v (Tab. 10). Na (Obr. 62) je zobrazena zatěžovací dráha pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) pro sérii 2. Z obrázku lze odečíst maximální naměřenou sílu před porušením, která je 1,02 kN. Průměrná vlhkost pro smrkové vzorky byla 28,89 %. Vzorky borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) dosahovaly vlhkosti 22,93 % a nejvyšší naměřená síla před porušením je 2,45 kN. Pro porovnání experimentálních výsledků lze použít (Tab. 9), kde jsou uvedené hodnoty vztažené k vlhkosti 30 %. Experimentálně stanovené hodnoty pro sérii 2 jsou uvedeny v tabulce (Tab. 12) ve sloupci B pro smrk a ve sloupci E pro borovici.

Průměrné ohybové moduly pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.)  $E_{m,\varnothing} = 3,974$  GPa při vlhkosti série 28,89 %. Vzorky borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), měli hodnotu  $E_{m,\varnothing} = 8,649$  GPa při vlhkosti 22,93 %.

MOR dle [96] a [100] pro vzorky s vlhkostí 30 % jsou pro smrk 44 MPa a pro borovici 50 MPa. Experimentálně stanovené hodnoty pevností pro vzorky smrku ztepilého (*Picea abies* L.) jsou  $f_{m,\varnothing} = 22,755$  MPa a vzorky borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) jsou  $f_{m,\varnothing} = 51,148$  MPa. Z výsledků je zřejmá shoda u vzorků s borovicí. Stanovené hodnoty pro smrk jsou na poloviční hodnotě.

Průměrná hodnota tlaku rovnoběžně s vlákny pro smrk  $f_{c,0} = 23,564$  MPa a pro borovici  $f_{c,0} = 22,604$  MPa. Pro porovnání lze použít (Tab. 9), kde hodnota pro smrk je  $f_{c,0} = 19,5$  MPa a pro borovici je  $f_{c,0} = 21,0$  MPa. V případě srovnání experimentálně stanovených hodnot s hodnotami ze zdrojů [96] a [100] lze konstatovat velice přesnou shodu. V obou případech je hodnota pro pevnost lehce vyšší u experimentálních hodnot než u hodnot nalezených ve zdrojích.

## E.1.10.3 Série 3

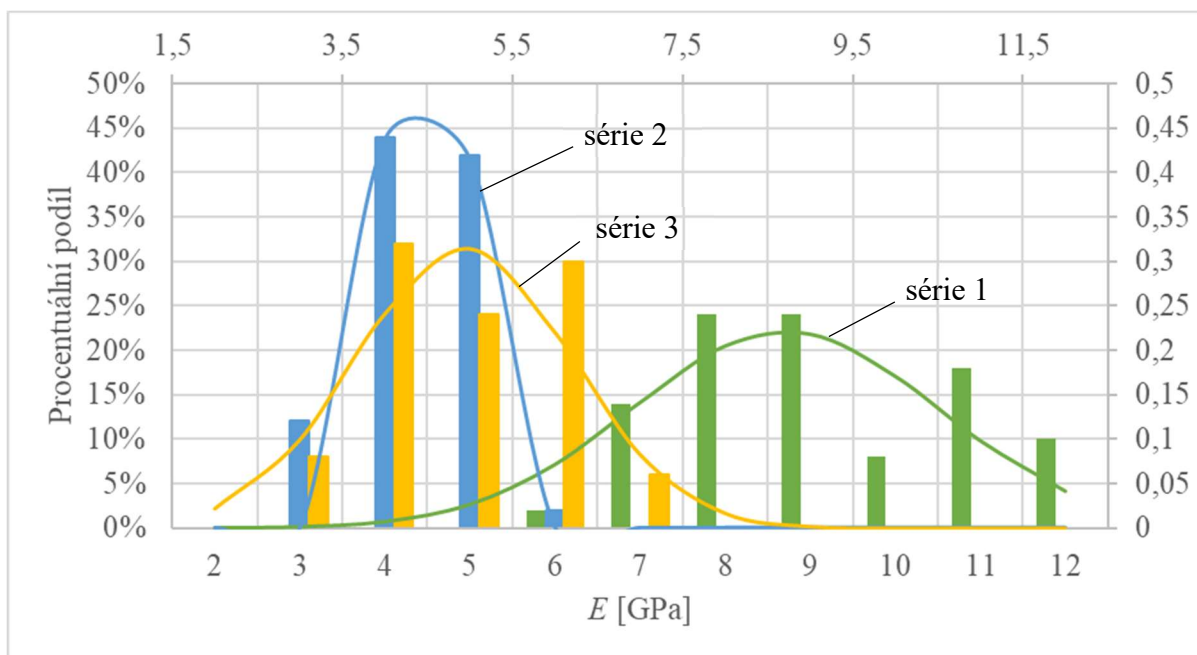
Série 3 byla stejně jako série 2 zvlhčena na hodnotu vlhkosti těsně pod hranicí *BNV*. Následně byly vzorky vysoušeny pomocí EMW na hodnotu 9 – 12 % jak je uvedeno v (Tab. 10). Vysoušení na tuto hodnotu bylo stanoveno z důvodu porovnání série 1 a série 3. Zatěžovací dráha pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) je zobrazena na (Obr. 64), ze kterého lze určit maximální sílu při porušení vzorku, která byla 1,65 kN pro vzorky s průměrnou vlhkostí 11,24 %.

Na (Obr. 65) je zaznamenána zatěžovací dráha pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.), ze které lze odvodit maximální sílu před porušením vzorku, která byla zaznamenána a je rovna 2,87 kN. Vzorky borovice měly průměrnou vlhkost 12,01 %. Lze tedy pro porovnání opět použít hodnoty z (Tab. 8) a (Tab. 9), kde jsou uvedeny hodnoty pro vlhkost 12 %.

Experimentálně stanovené hodnoty pro sérii 3 jsou uvedeny v (Tab. 12). Hodnoty pro smrk jsou ve sloupci C a výsledné hodnoty pro borovici jsou uvedené ve sloupci F. Průměrné ohybové moduly pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.)  $E_{m,\varnothing} = 4,448$  GPa. Vzorky borovice lesní (*Pinus sylvestris* L), měli hodnotu  $E_{m,\varnothing} = 7,657$  GPa. Experimentálně stanovené hodnoty pevností pro vzorky smrku ztepilého (*Picea abies* L.) jsou  $f_{m,\varnothing} = 32,524$  MPa a vzorky borovice lesní (*Pinus sylvestris* L) jsou  $f_{m,\varnothing} = 61,151$  MPa. Při porovnání s výsledky z (Tab. 8) je viditelná odlišnost, která mohla být způsobena vysoušením pomocí EMW. Průměrná hodnota tlaku rovnoběžně s vlákny pro smrk  $f_{c,0} = 47,659$  MPa a pro borovici  $f_{c,0} = 34,180$  MPa. Pro porovnání lze použít (Tab. 9) a konstatovat vysokou shodu s výsledky. Při srovnání se sérií 1 lze zaznamenat zvýšení pevnosti v tlaku.

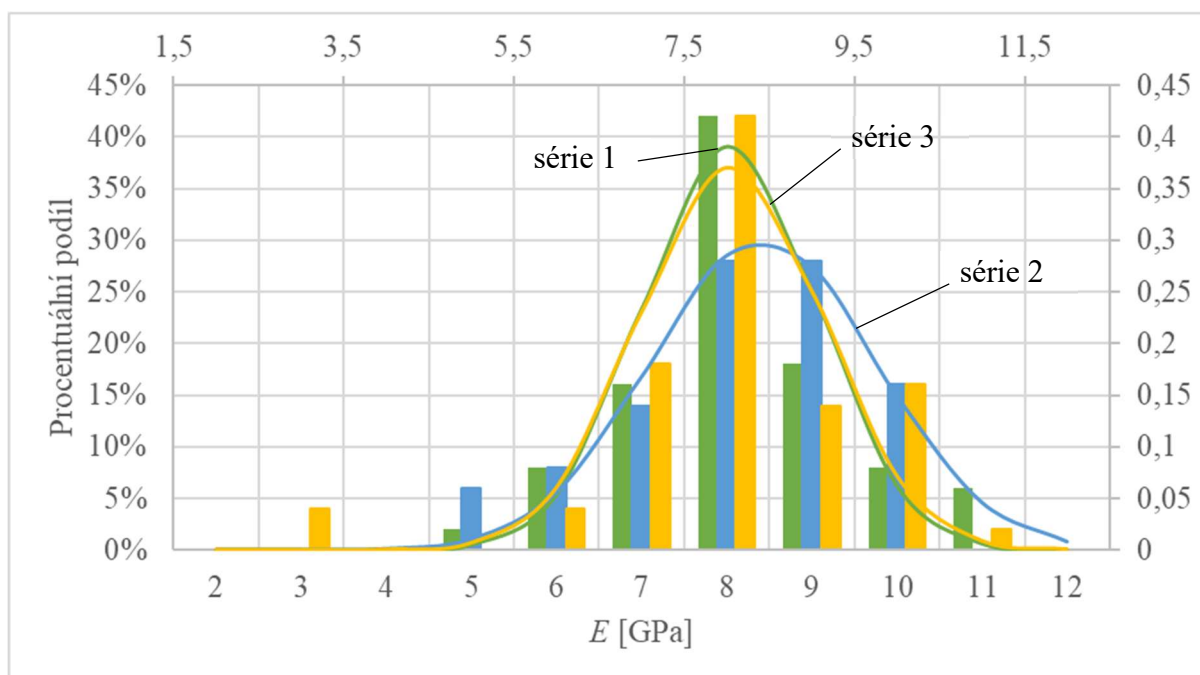
E.1.11 Porovnání lokálního ohybového modulu  $E$  pro všechny série

Výsledné hodnoty lokálního MOE všech tří sérií pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) jsou zobrazeny na (Obr. 71), 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. Vstupní hodnoty pro každou sérii jsou uvedeny v (Tab. 10). Z obrázku (Obr. 71) 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 vysušení došlo ke snížení MOE vzorků mezi sérií prvků 1 a sérií prvků 2 o 44,5 %.



Obr. 71: 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.).

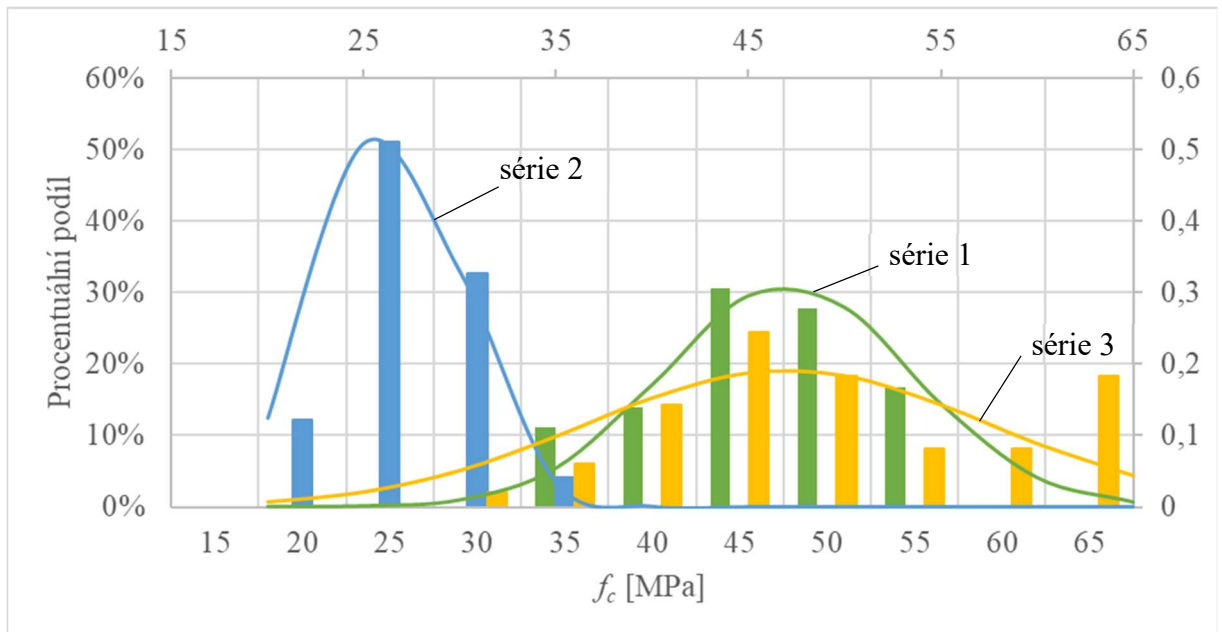
Na (Obr. 72) jsou zobrazeny všechny tři série, které byly naměřeny pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.). Ze zobrazení výsledných hodnot lokálního MOE je velice patrné, že borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) není tak náchylná na změnu vlhkosti jako je tomu u smrku ztepilého (*Picea abies* L.). 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.



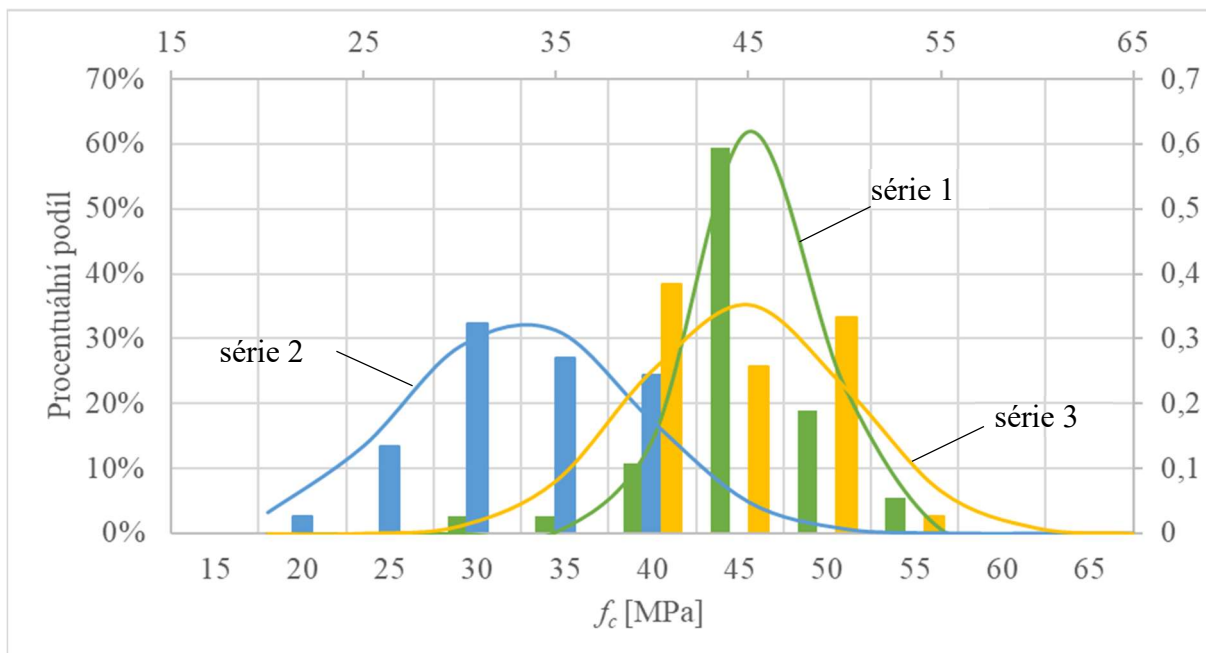
Obr. 72: Výsledky zatěžovacích zkoušek – lokální MOE s vyznačením normálních rozdělení pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

E.1.12 Výsledky tlaku rovnoběžně s vlákny  $f_{c,0}$  pro všechny série

Na (Obr. 73) jsou zobrazeny výsledky tlakových zkoušek pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) Výsledné hodnoty pro borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) jsou zobrazeny na (Obr. 74). Pro obě dřeviny platí, že výsledná hodnota tlaku pro sérii 3 je vyšší než hodnota tlaku pro sérii 1.



Obr. 73: Výsledky zatěžovacích zkoušek – tlak rovnoběžně s vlákny s vyznačením normálních rozdělí pro sérii 1 (zelená barva) až po sérii 3 (žlutá barva) pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.).



Obr. 74: 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.).

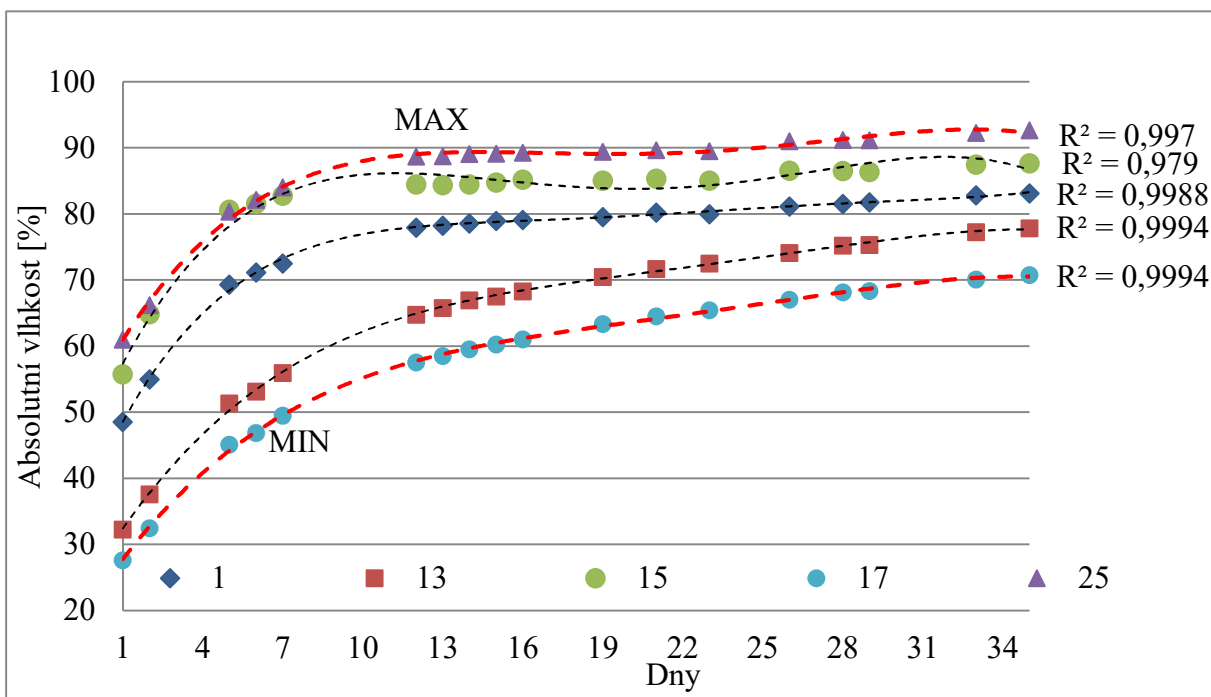
Z výsledků je vidět, že smrk je více náchylný na zvýšení vlhkosti než borovice. V sérii 2 klesla hodnota tlaku rovnoběžně s vlákny na přibližně polovinu, u borovice tato hodnota klesla přibližně o jednu třetinu.

### E.1.13 Diskuze nad výsledky experimentu EX1

Stanovené hodnoty pevnosti v ohybu  $f_m$  pro zkoušené vzorky byly velice podobné jako hodnoty nalezené v literatuře. Pro případ stanovení lokálního MOE, nelze konstatovat tak přesnou shodu výsledků. Rozdílnost hodnot mohlo být způsobeno volbou vysoušení vzorků. Při vysoušení byly vzorky vystaveny teplotě + 103 °C, kde došlo k vyloučení části pryskyřice ze vzorků. Větší množství pryskyřice bylo vyloučeno z borového dřeva. Tímto vznikl prázdný prostor ve struktuře dřeva, který mohl být vyplněn vzduchem nebo vodou v závislosti na vlhkosti vzorků. To zřejmě způsobilo snížení odolnosti proti působícímu zatížení, a tím ke snížení mechanických vlastností dřeva.

## 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. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny na (Obr. 75). Jsou zde zobrazeny pouze hodnoty pěti vybraných vzorků pro snadnější orientaci. Vzorek číslo 25 byl nejvíce zvlhčen a je v (Obr. 75) označen jako maximum. Naopak vzorek 17 přijímal vlhkost nejmaleji a v (Obr. 75) je označen jako minimum. V grafu je patrné velice rozdílné první měření. Rozdíly jsou patrné v průběhu i na konci měření experimentu. Výsledky měření byly proloženy polynomem čtvrtého řádu, který nejvíce popisoval trend vývoje výsledků. Byly vypočítány korelační koeficienty, které se pohybují od 0,979 do 0,997. Lze tedy předpokládat, že se jedná o hodnoty závislé. Dokazuje to také, že zůstanou stále v podobném odstupu a nepotkají se v jednom bodě se stejnou vlhkostí. Na (Obr. 75) je také vidět, jak rozdílně vstupuje voda do jednotlivých vzorků. V první části zvlhčování do 11. dne vlhkost stoupala více strměji. Tento 11. den měly vzorky absolutní vlhkost od 55 %, což platilo pro vzorek 17, do hodnoty 87 %, platné pro vzorek 25. Za tímto bodem došlo k útlumu sorpce vlhkosti, jak je na (Obr. 75) dobře patrné. Ve spodní části (Obr. 75) je uvedená legenda, která označuje symboly pro vybrané vzorky.



Obr. 75: Průběh vlhkosti vybraných vzorků.

Pro experiment bylo potřeba připravit pět skupin se vzorky, aby jejich průměrná vlhkost byla co nejvíce podobná ostatním skupinám a tím bylo zajištěno, že výsledky budou mezi skupinami porovnatelné. Vzorky byly rozděleny podle (Tab. 13) do pěti skupin s označením A až E. V (Tab. 13) jsou uvedené výsledné průměry každé skupiny a její odchylka od průměrné vlhkosti počítané ze všech vzorků.

Tab. 13: Vlhkosti vzorků po zvlhčování.

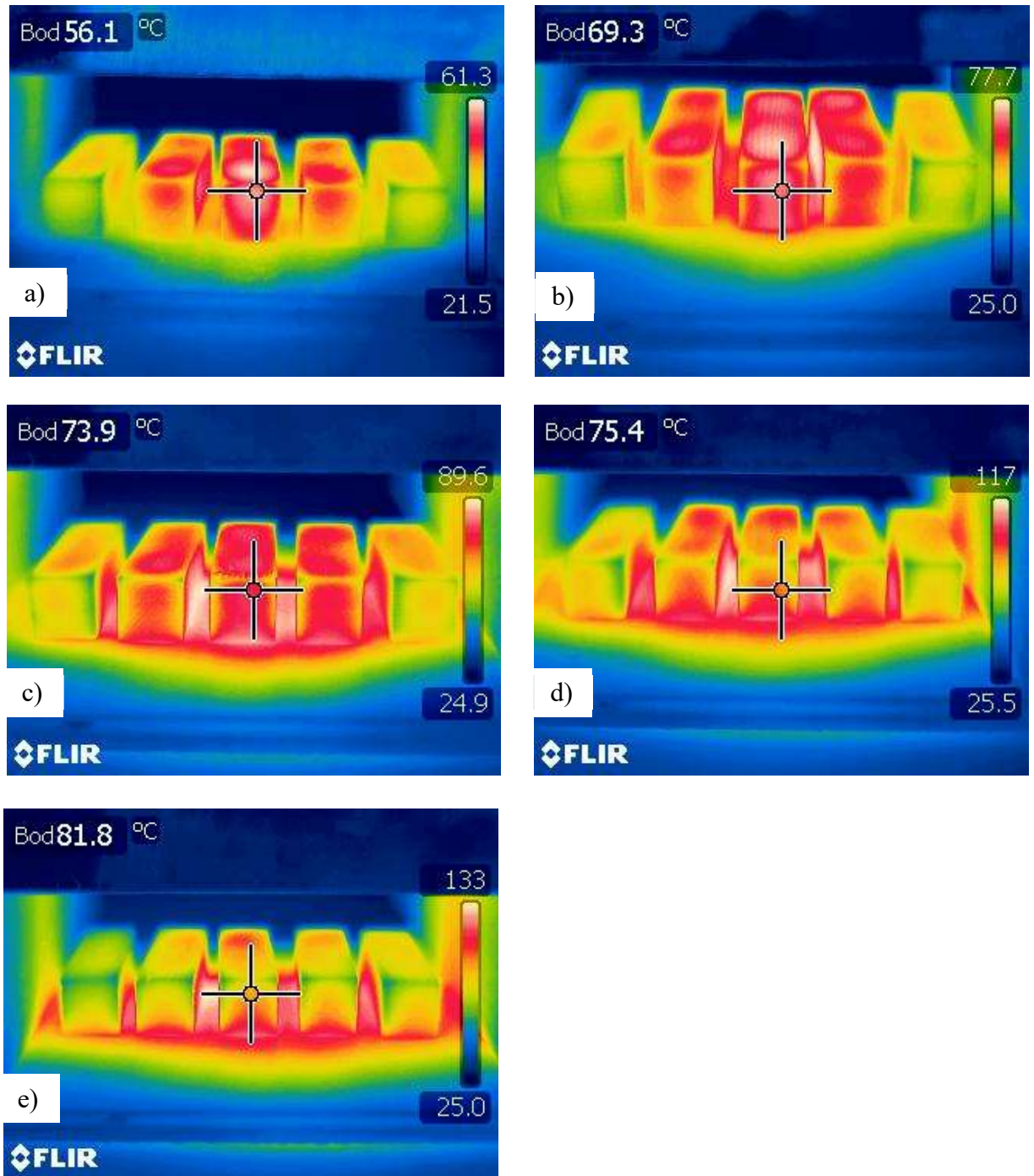
číslo vzorku	Absolutní vlhkost [%]	Skupina	číslo vzorku	Absolutní vlhkost [%]	Skupina	číslo vzorku	Absolutní vlhkost [%]	Skupina
1	86,36	E	10	74,69	B	18	80,28	A
2	96,32	E	11	76,95	D	19	88,70	B
3	88,89	C	12	83,29	C	20	77,31	E
4	93,93	B	13	81,45	B	21	76,22	C
5	93,34	E	14	83,79	D	22	93,33	D
6	94,49	C	15	93,24	C	23	90,66	D
7	91,08	A	16	86,71	A	24	93,45	A
8	90,67	E	17	73,73	A	25	96,20	D
9	92,61	B						

Jak je z (Tab. 14) patrné, tak průměrná vlhkost všech vzorků byla 87,108 % a největší odchylka od průměru byla 2,057 %

Tab. 14: Rozdělení vzorků do skupin.

Průměr skupiny [%]	85,051	86,277	87,227	88,185	88,799	87,108
Odchylka od průměru	2,057	0,831	-0,119	-1,077	-1,691	
Skupina	A	B	C	D	E	Průměr ze vzorků
Čas ozařování [min]	3	6	9	12	15	

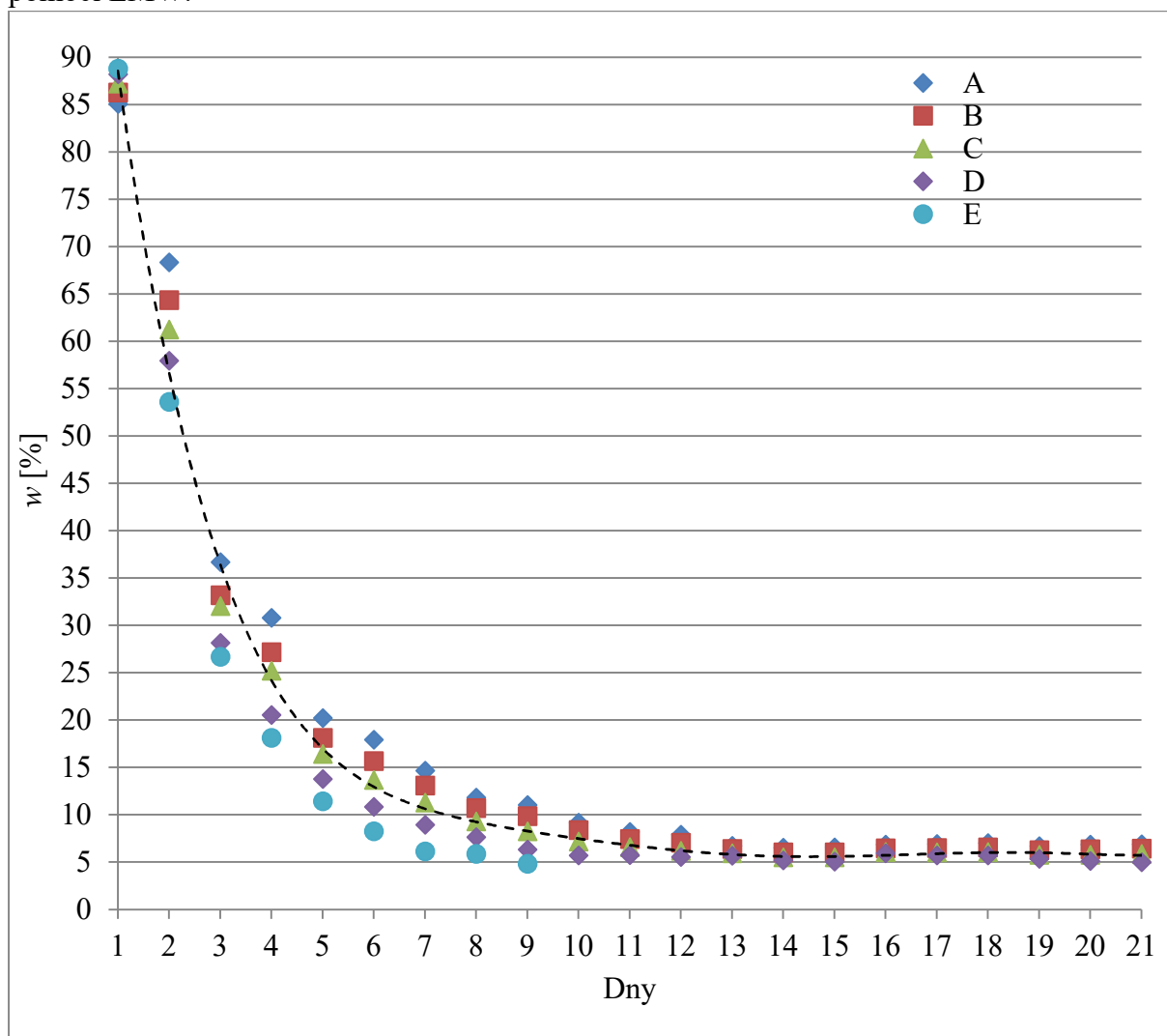
Podle (Tab. 14) byly jednotlivým skupinám přiřazen čas, po který byly vystaveny mikrovlnnému záření. Skupina A byla vystavena 3 minuty, skupina B 6 minut, skupina C 9 minut, skupina D 12 minut a skupina E 15 minut. Následně byly vzorky po jednotlivých skupinách vkládány pod generátor mikrovlnného záření 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. 76) 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 vztažena k záměrnému kříži, který byl měřen na prostředním vzorku.



Obr. 76: 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.

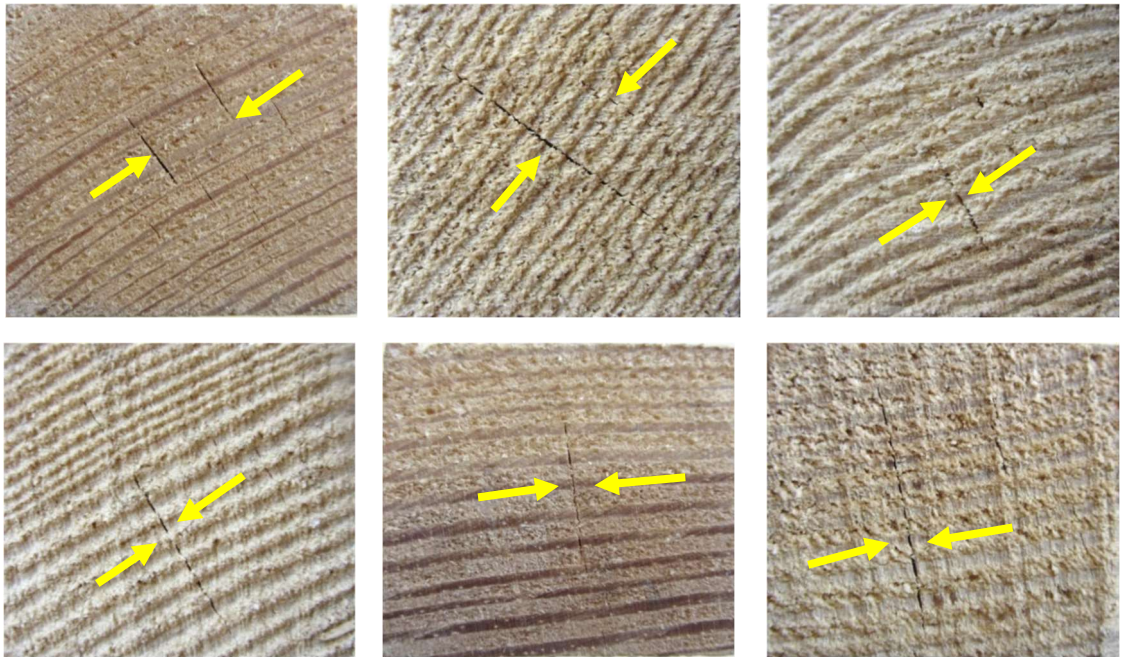
V (Obr. 77) jsou znázorněny výsledné hodnoty vlhkosti jednotlivých skupin. Pro skupinu byl experiment ukončen, když dosáhl hodnoty 5 % relativní vlhkosti. Této hodnoty dosáhla skupina E, která byla vysoušena 15 minut za 8 cyklů a skupina D, která byla ozařována 12 minut až po 20 cyklech. Další skupiny 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. 77) znázorněny barevnými body. Dále je v (Obr. 77) vyznačena střední hodnota vlhkosti všech skupin, která je naznačena černou čárkovanou křivkou a zobrazuje trend vysychání za pomoci EMW.

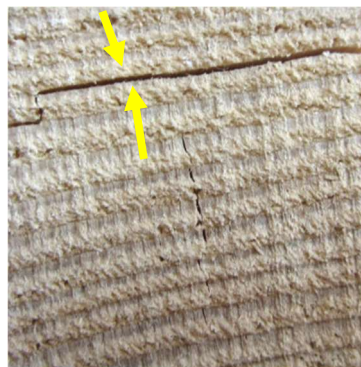


Obr. 77: Průměrná vlhkost skupin vzorků v průběhu vysoušení. Skupina E dosáhla 9. den hodnoty 5 % a byl pro tuto skupinu ukončen experiment.

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. 78). Dále byla objevena i trhlina ve směru rovnoběžném s vlákny, ta je vidět na (Obr. 79).



Obr. 78: Poškození v kolmém směru na vlákna.



Obr. 79: 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. Výsledná vlhkost je na (Obr. 18). Práce obsahuje porovnání mezi jednotlivými difúzními modely popsané v kapitole B.9.

Druhý cíl disertační práce – numerické a experimentální testování vybraných vlastností dřeva při zvýšené 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. 12).

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 vysušeny 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. 12). 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 nesnížení pevnost dřeva což bylo ověřeno experimentem EX1.

Ke splnění cílů disertační práce bylo vytvořeno šest 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.

Pro numerické výpočty byl definován způsob, jak postupovat v případě nedostatečných okrajových podmínek ve smyslu okolní teploty a vlhkosti. Navržený způsob lze implementovat na požadovanou lokalitu a vypočítat potřebné vstupní hodnoty do simulací jak je popsáno v kapitole D.4 Okrajové podmínky

## G ZKUŠENOSTI V RÁMCI MOBILITNÍCH PROGRAMŮ

V rámci posgraduálního studijního programu byl autor tiseruční práce dvakrát na zahraniční stáži. První zahraniční stáž byla provedena v roce 2016 a financována z programu Erasmus +. Druhá zahraniční stáž byla realizována v roce 2017 s finanční podporou z programu Freemovers. Obě stáže byly v Helsinkách ve Finsku ve firmě VTT Technical Research Centre of Finland LTD.

### G.1 Experiment ze stáží ve Finsku (EXF) - Experiment s navlháním in-situ

Měření a data, která byla použita pro tento experiment byla provedena v rámci evropského projektu Durable Timber Bridges [99]. Data byla autorovi práce poskytnuta v rámci zahraničních stáží ve firmě VTT Technical Research Centre of Finland LTD v Helsinkách ve Finsku. Autor v rámci stáže prováděl numerické modelování v programu ABAQUS, které porovnával s naměřenými daty z měření.

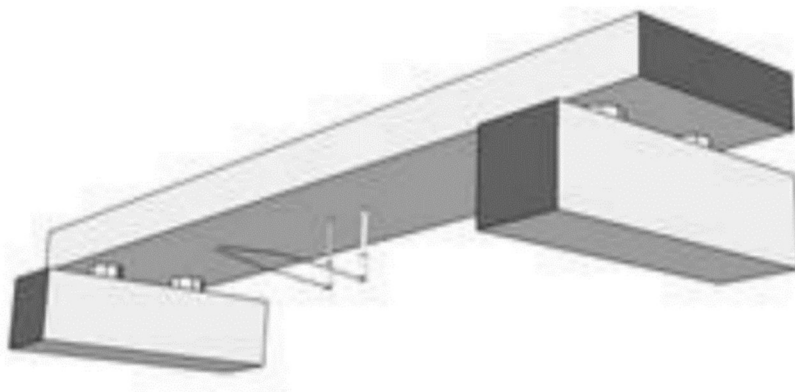
Experiment probíhal na smrkovém dřevě (*Picea abies* L.), který byl vystaven okolním povětrnostním podmínkám. Měření probíhalo na vzorku o rozměrech  $22 \times 95 \times 400$  mm, který je vidět na (Obr. 80). Vzorek byl umístěn na střeše švédské univerzity v Lundu od roku 2009 do roku 2011 [66]. Pro kalibraci numerického modelu byla použita naměřená klimatická data z blízké meteorologické stanice, která byla umístěna na střeše univerzity, kde experiment probíhal.



Obr. 80: Měřený vzorek. Převzato z [66].

Na této střeše byla umístěna meteorologická stanice, která zaznamenávala ve zvolených časech po jedné hodině teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, směr větru a úhrn srážek.

Experiment probíhal od 22. 9. 2009 do 23. 3. 2012. Měřicí čidlo, které měřilo a zaznamenávalo vlhkost po jedné hodině, bylo umístěno na spodní části vzorku v polovině rozpětí. Měření probíhalo v polovině tloušťky celého vzorku, tedy v 11 milimetrech. Umístění měřicího čidla je zobrazeno na (Obr. 81).



Obr. 81: Umístění čidla. Převzato z [66].

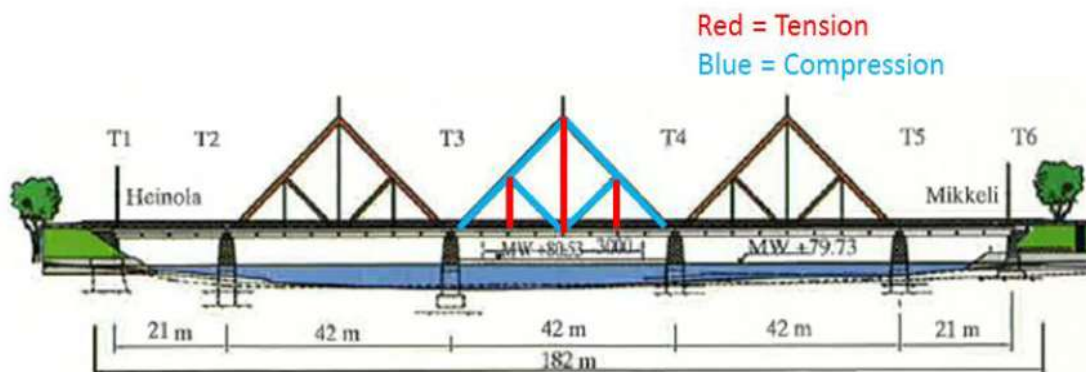
## G.2 Vihantasalmi bridge

Tato kapitola popisuje možnou implementaci použití výpočetního modelu na reálnou dřevěnou stavbu, která je dlouhodobě vystavená povětrnostním účinkům.

Most Vihantasalmi byl dokončen v září 1999. Nahradil původní ocelový most. Konstrukce má připomínat tradiční finskou vánoční dekoraci ze slámy [57].

Rozpětí mostu je  $21 + 42 + 42 + 42 + 21 = 168$  m (Obr. 82). Šířka mostu je 14,0 m z toho jsou 3,0 m používány jako cyklostezka. Konstrukce je vytvořená z lepeného laminovaného dřeva.

Tento most je největší dřevěný most na světě co se plochy týče a je celý vidět na panoramatickém snímku, který je na (Obr. 83).

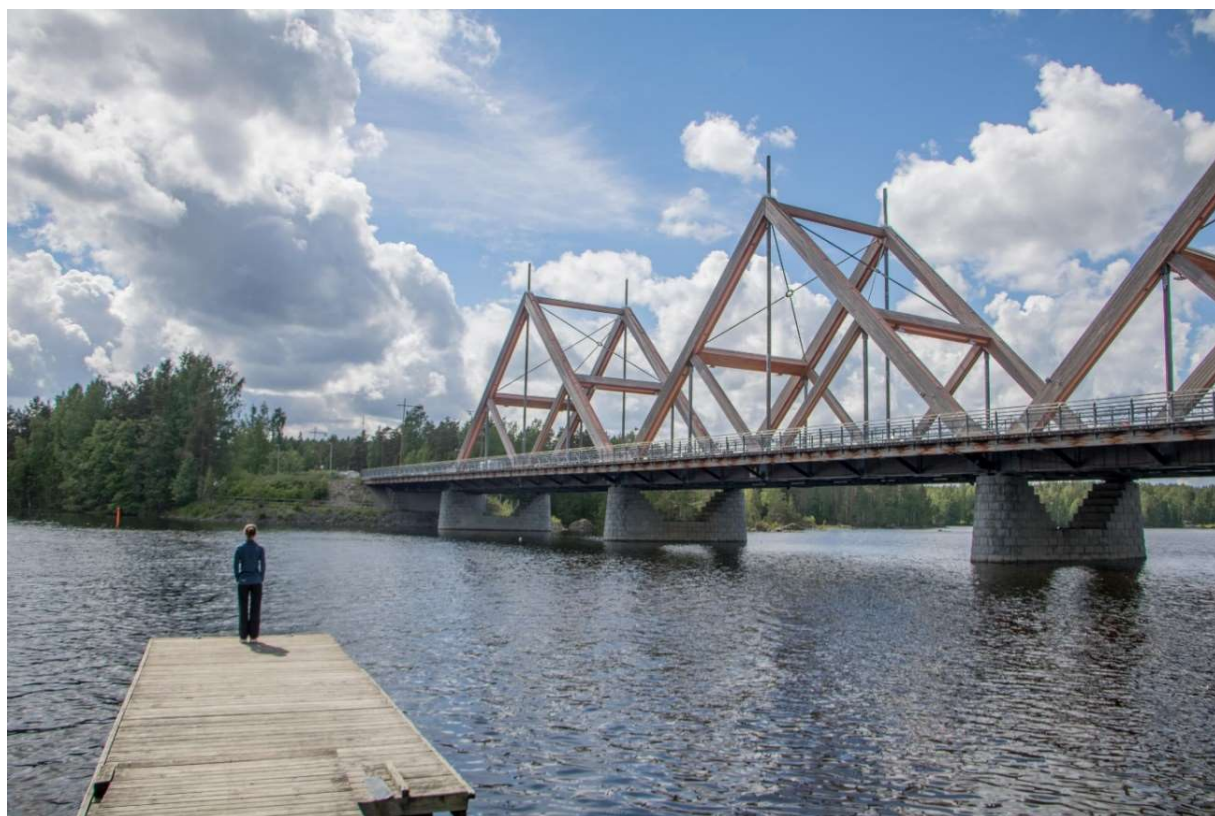


Obr. 82: Rozměry mostu Vihantasalmi. Převzato z [82].

Na (Obr. 84) a (Obr. 85) jsou zobrazeny pohledy na most z první a levé strany.



Obr. 83: Panoramatický pohled na most Vihantasalmi. Zdroj autor.



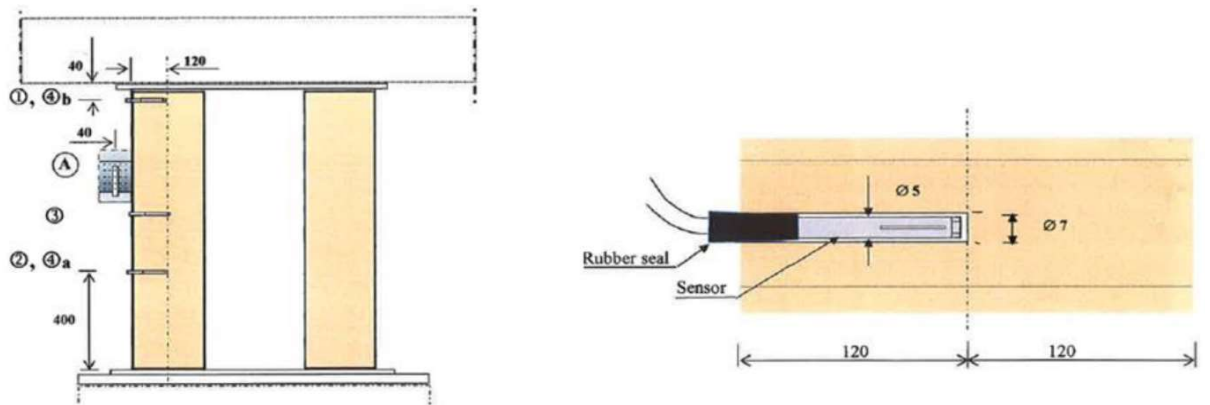
Obr. 84: Pohled na most.



Obr. 85: Pohled na most.

Při návrhu konstrukce mostu byly využity výsledky nejnovějších výzkumných a vývojových prací na dřevěných mostech. Tato výzkumná práce probíhala společně s Národní správou silnic a Technologickou univerzitou v Helsinkách od konce 80. let v rámci severské spolupráce od 90. let 20. století. Navíc bylo provedeno zkoušení únavy na hmoždinkách použitých v dřevěno-betonovém mostě, aby se ověřila účinnost vybraných typů hmoždinek a lepidla [57].

Nosnou část vozovky tvoří lepené vazníky, které mají výšku 1350 mm a šířku 265 mm. Nad nosníky je skladba vozovky o výšce 500 mm. V těchto nosnících je umístěno několik čidel, které monitorují teplotu a vlhkost. Zabudování čidla je zobrazeno na (Obr. 86) [82]. Čidlo má průměr 5 mm, otvor má průměr 7 mm a hloubku 120 mm. Povrch lamely je upatřen gumovou zátkou aby nedocházelo k zatékání dešťové vody do otvoru a tím ke zkreslení výsledků.



Obr. 86: Znázornění umístění teplotně vlhkostního čidla ve vazníku mostu. Převzato z [82].

Pohled zespodu mostu je na (Obr. 87), kde je vidět vyložení pruhu pro cyklostezku. Jedná se o konsolu v levé části smínku. Dále je na tomto obrázku patré ošetření dřeva. Jako nátěr byl použit kreosol.

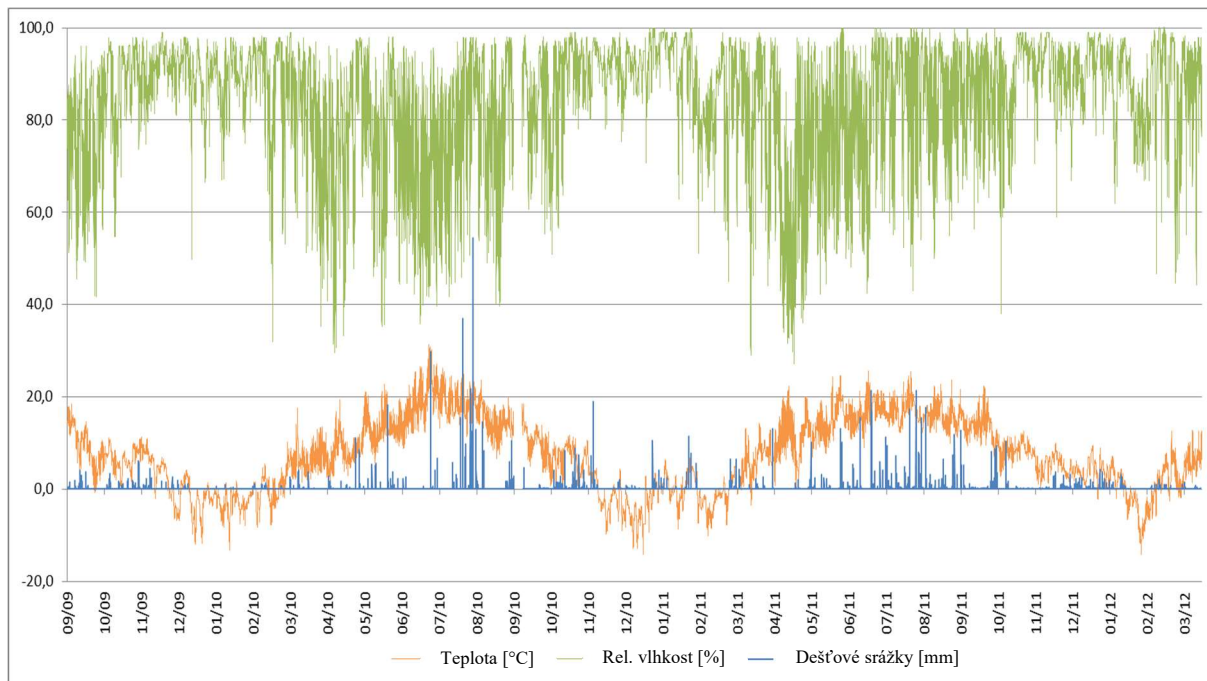


Obr. 87: Pohled na lepené lamelové nosníky mostu.

### G.3 Výsledky a vyhodnocení experimentu EXF

Numerická simulace tohoto experimentu probíhala v konečno-prvkovém výpočetním programu ABAQUS [1]. Modelování šíření vlhkosti nad bodem nasycení vláken je náročné, protože se ve dřevě vyskytuje voda současně v několika fázích a jejich kombinovaný vliv na šíření vlhkosti není zatím dostatečně matematicky popsán. Z těchto důvodů byl zvolen zjednodušený jednofázový model šíření vlhkosti [43] upravený tak, aby dokázal popsat i stavy nad bodem nasycení vláken s dostatečnou přesností.

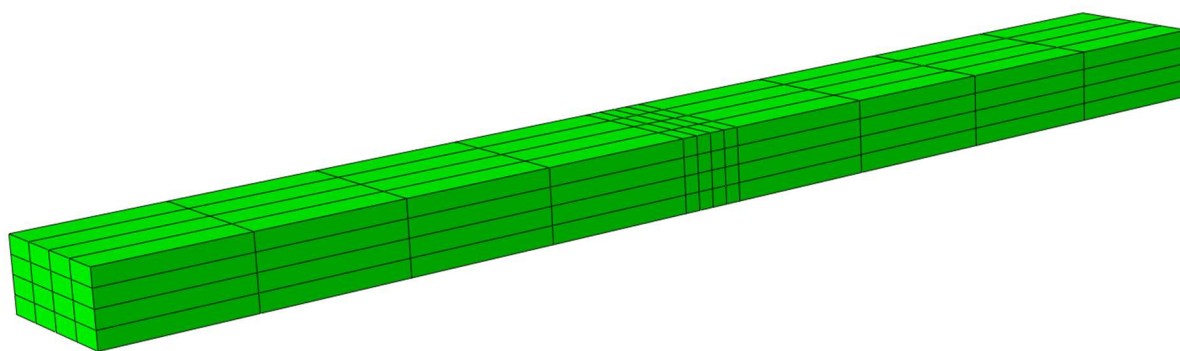
Pro výpočetní 3D simulaci byly z naměřených meteorologických dat vybrány teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a úhrn srážek. Zobrazení průběhu relativní vlhkosti, teploty a úhrnu srážek je zobrazeno na (Obr. 88). Zelená křivka zobrazuje průběh relativní vlhkosti v procentech. Teplota je uvedena ve stupních celsia a je zobrazena oranžovou křivkou. Modrá křivka označuje úhrn srážek v milimetrech. Meteorologická stanice v době od 16. 9. 2010 18:00 do 23. 9. 2010 13:00 nezaznamenávala data. Chybějící data byla převzata z ECMWF (European Centre for Medium – Range Weather Forecast) [36] z databáze ERA-INTERIM 128 [39]. Byl převzatý celý měsíc září v oblasti města Lund. Z databáze byla stažena teplota ve dvou metrech nad zemí a teplota rosného bodu. Z těchto hodnot byla s pomocí vztahů (62), (63), (64), (65) a (66) [82] určena relativní vlhkost. Teplota se v (62) až (65) uvažuje v kelvinech. Průběh výpočtu je zobrazen na (Obr. 36), vztahy (62) až (65) mají podmínky, za kterých lze jaký vztah použít. Hranice výběru je dána 273,15 K. Vztah (66) se následně použije na výpočet relativní vlhkosti. Vypočítaná relativní vlhkost byla porovnána s naměřenými hodnotami. Bylo zjištěno, že hodnoty jsou téměř totožné, odchylky byly v řádech desetin procent.



Obr. 88: Klimatická data.

V programu ABAQUS 6.14 [1] byl vytvořený symetrický model vzorku. Tento model se symetrickými okrajovými podmínkami byl vytvořen z důvodů náročnosti výpočtového modelu. Tímto postupem se snížil výpočtový čas. Na vzorku byly vytvořeny tři rozdílné povrchy, aby bylo možné lépe numericky simulovat skutečné chování vzorku. První povrch byl horní, druhý povrch byl boční a třetí byl spodní. Na tyto povrchy bylo v simulacích aplikováno počasí, které vycházelo z dat z naměřeného skutečného počasí, získaná z meteorologické stanice. Tato data obsahovala teplotu a relativní vlhkost vzduchu. Bylo uvažováno, jak do výpočtu zohlednit úhrny srážek, když vstupní data pro simulaci jsou připraveny pouze na dva vstupy a to teplotu a relativní vlhkost. Pro zohlednění byla vybrána a modifikována relativní vlhkost a to tak, že v době deště byla uměle zvýšena na 100 %. Po dešti byla hodnota relativní vlhkosti vrácena zpět na původní měřenou hodnotu. Tyto úpravy byly uvažovány jen na dvou površích a to na horním a bočním. Spodní povrch nebyl efektem deště ovlivněn, protože na něj nemohlo nepršet. Byly vypočítány dvě simulace. Jedna simulace byla s variantou bez uvažování efektu deště, tedy i v případě deště nedošlo k umělému zvýšení naměřené relativní vlhkosti na hodnotu 100 %, ale bylo do simulace použity skutečné naměřené hodnoty. Druhá simulace byla uvažována s efektem deště. Tedy při zaznamenaném dešti došlo ke zvýšení hodnoty relativní vlhkosti na hodnotu 100 %. Takto upravené počasí bylo použito jen na površích, které mohly být ovlivněny deštěm a to jsou povrchy horní a boční. Výpočet numerické simulace byl proveden v upraveném podprogramu DFLUX [43] a [80], který byl upraven při řešení výzkumných projektů ve společnosti VTT Technical Research Centre of Finland LTD.

Model pro výpočet 3D vlhkostního pole byl vytvořený z elementů DC3D8, které jsou tvořeny osmi uzly a vytváří lineární šestistěn [1]. Elementy jsou vhodné pro difúzní přenos vlhkosti [1]. Materiálový model byl uvažovaný ortotropní s cylindrickou soustavou, která v průběhu dřeva zohledňuje letokruhy a tím více popisuje skutečnost. Síť konečných prvků byla vytvořena s ohledem na snížení počtu elementů, ale s dostatečnou přesností v místě umístění čidla, proto byl model vytvořen s hustší sítí uprostřed rozpětí. Zde byla síť konečných prvků vytvořena s krychlí o straně 5 mm v ostatních částech byla síť konečných prvků z kvádrů o rozměru  $5 \times 5 \times 45$  mm. Výpočtový model se sítí konečných prvků je vidět na (Obr. 89) [32]. Hustota dřeva byla uvažována o velikosti  $450 \text{ kg/m}^3$ .



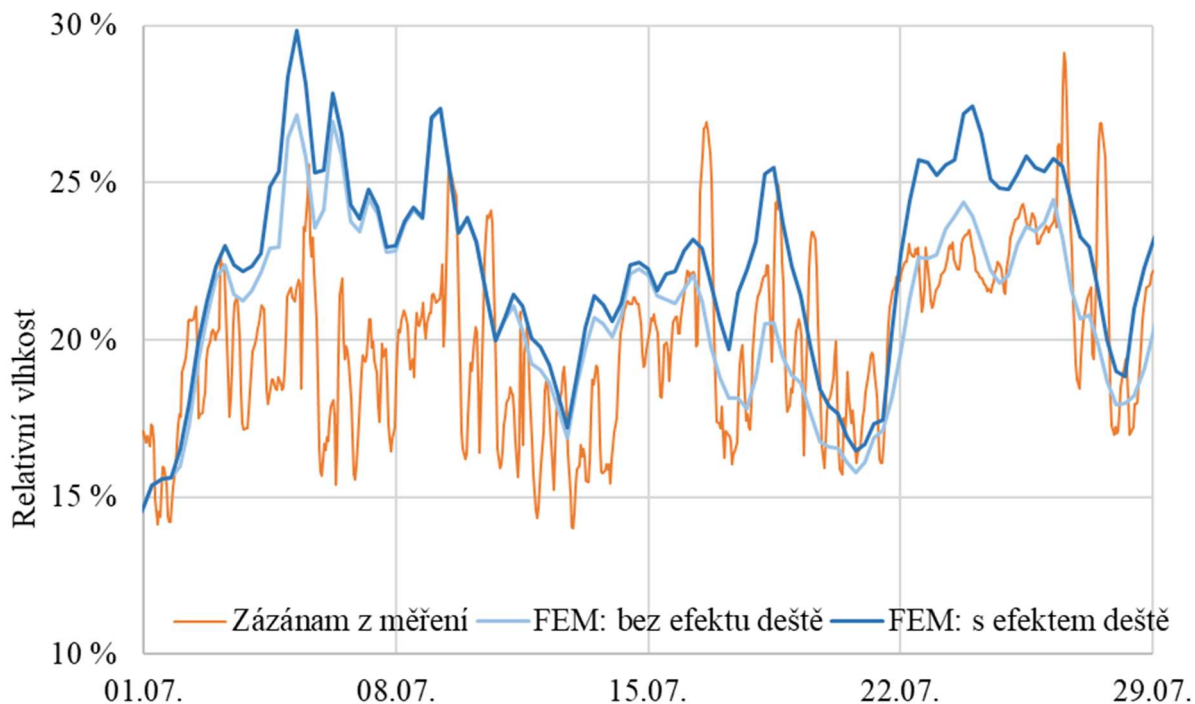
Obr. 89: Výpočtový model.

Tento výpočtový model byl vyvinut a kalibrován na VTT Technical Research Centre of Finland. Jako podklad pro kalibraci numerického modelu sloužil vybraný experiment provedený na Lundské Univerzitě ve Švédsku v rámci výzkumného projektu Durable Timber Bridges [66]. Kalibrace okrajových podmínek pro numerický model a ověření vhodnosti vybrané difúzní křivky probíhala úpravou měřených klimatických dat, aby bylo vystihnuto současné šíření volné vody, vázané vody a vodní páry.

Vstupní data pro simulační výpočet složená z naměřených teplot a vlhkostí byla do výpočtu vložena se záznamem po jedné hodině. Výpočetní krok v programu ABAQUS byl stanovený po šesti hodinách. Tento časový úsek pro výpočetní krok byl nastaven z důvodů snížení výpočtového času. Na (Obr. 90) a (Obr. 91) jsou zobrazeny naměřené hodnoty i výsledky numerických simulací se zadáním bez efektu deště i s efektem deště. Oranžová křivka na (Obr. 90) a (Obr. 91) označuje naměřená data v polovině rozpětí vzorku a v jeho polovině tloušťky. Světle modrá křivka zobrazuje výsledky numerické simulace bez uvážení efektu deště. Křivka zobrazená tmavě modře reprezentuje výsledky numerických simulací s pozitivním efektem deště. Na vodorovné ose je znázorněný čas ve dnech. Svislá osa označuje vlhkost

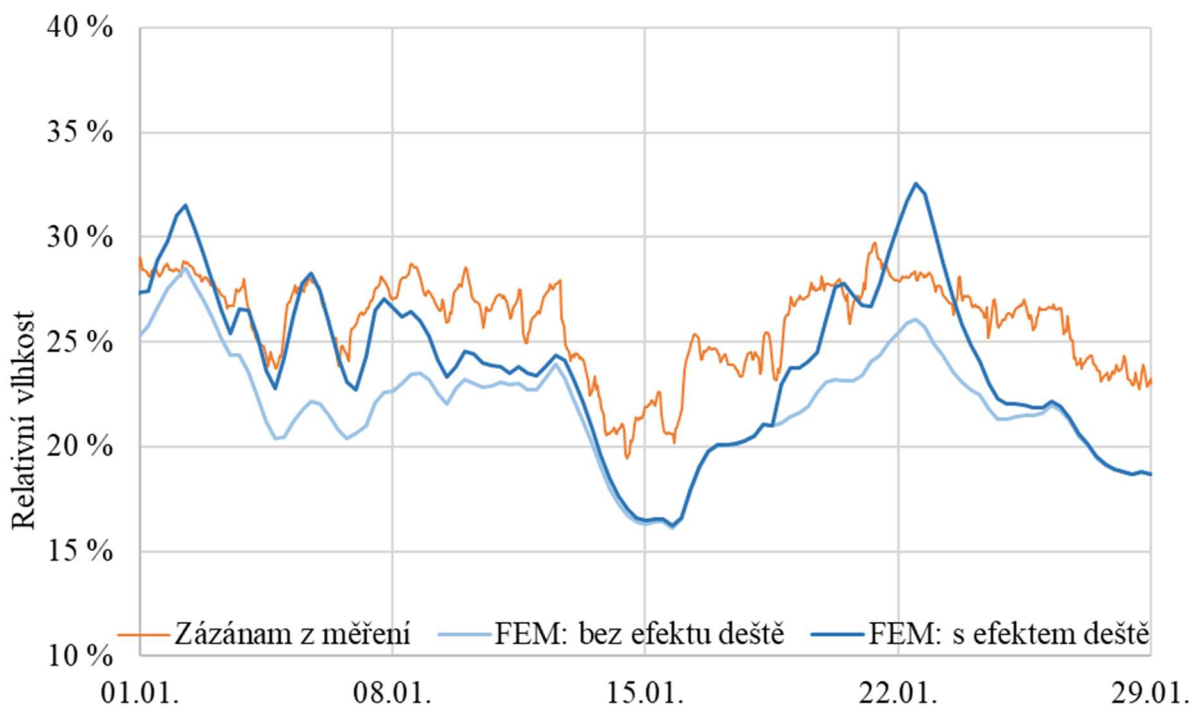
v procentech. Pro ilustraci výsledků jsou uvedeny výsledky z letního (Obr. 90) a zimního období (Obr. 91). Tento výběr byl proveden s ohledem na možnosti prezentace výsledků.

Na (Obr. 90) jsou zaznamenány výsledky z července roku 2011. Odchylka mezi měřením a numerickou simulací bez vlivu deště je menší než u výsledků numerické simulace s efektem deště. Ovšem výpočty numerické simulace s efektem deště více korelují v místech s vyššími vrcholy podle skutečného měření. Z výsledků provedeného měření je vidět, že i v letních měsících se vlhkost místy pohybuje nad mezí bodu nasycení vláken.



Obr. 90: Výsledky v letním měsíci.

Z (Obr. 91) je vidět, že v průběhu měsíce ledna roku 2012, byla měřena vyšší vlhkost ve vzorku než obě numerické simulace. V tomto období je blíže skutečnému měření numerická simulace s uvážením efektu deště, kde má více přesné výsledky a lépe kopíruje tvar měření než výsledky numerické simulace bez uvážení efektu deště. To že jsou obě numerické simulace níže než měřená data, je zřejmě způsobeno tím, že v tomto období byla na vzorku voda ve formě sněhové pokrývky a ledu. Ta se v případě zvýšení teploty začala rozpouštět a smáčela tím povrch dřeva, tím se zvyšovala vlhkost vzorku, aniž by došlo k zaznamenání srážek meteorologickou stanicí. V zimním období bude potřeba zajistit další koeficient, který bude určovat, že v případě teploty pod 0 °C a zaznamenaných srážek zůstane na povrchu vlhkost po delší dobu, tedy zavést efekt vysoušení. Toto by mělo za následek, že by se numerická simulace více dostala k hodnotám skutečného měření, a tedy i blíže realitě. Z naměřených dat je také velice dobře vidět, že podstatnou část měsíce je dřevo nad bodem nasycení vláken.



Obr. 91: Výsledky v zimním měsíci.

Výpočetní krok numerických simulací byl stanoven na 6 hodin. To znamená že 6 hodin byl maximální krok, mezi kterými Abaqus počítal své vlastní iterace. Řešící algoritmus postupuje podle iterační metody a postupně zkracuje časové kroky. Tímto způsobem mohlo dojít k tomu, že vstupní data, která byla zaznamenána po jedné hodině, byla v některých částech přeskočena. Tedy mohlo dojít k tomu, že nebyly do výpočtu započteny hodnoty např. jednohodinového deště. Toto může být důvod drobného nesouladu výsledků naměřených dat a výsledků numerických simulací. Další nesrovnalosti způsobuje chyba měřícího čidla, které měří s vlastní

přesností a chybovostí. Pro ještě větší spolehlivost numerického modelu by bylo vhodné do výpočtu doplnit koeficient efektu vysychání, který jistě bude jiný v létě a v zimě. Bylo by zajištěno, že po dešti by na povrchu vzorku zůstala vyšší vlhkost, která by postupně vysychala. Tímto efektem by byly opatřeny pouze povrchy, na kterých může voda zůstat po skončení deště. Tento efekt by mohl zajistit vyšší korelaci s naměřenými výsledky.

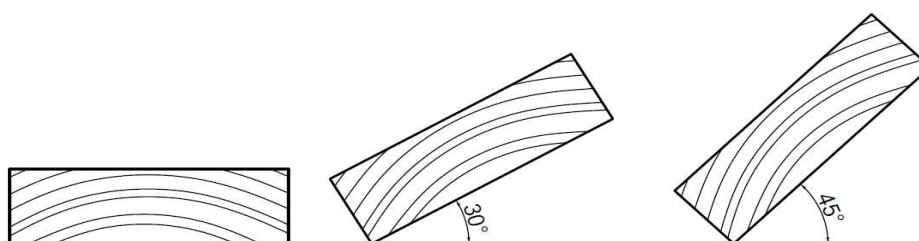
#### G.4 Závěr experimentu EXF

Z experimentu je vidět, že naměřená data v létě přesněji numerickou simulaci bez uvážení dešťových srážek, ovšem v zimě je do simulace přidat efekt deště nebo lépe efekt ledu na povrchu. Pro přesnější nastavení numerického výpočtu je za potřebí získat přesnější data o srážkách a také o tom jak dlouho zůstává na povrchu vzorku. Ukázalo se, umělé zvýšení vlhkosti v případě deště na vlhlost na 100 % vykazuje velice přesné výsledky a to hlavně v zimním období, kdy nemzlo. Dále se ukázalo za velice přesné použití statistického roku popsaného v kapitole D.4. Takto lze nahradit chybějící meteorologická data v případě výpadku záznamu na stanici bez zkreslení naměřených výsledků.

## H NAVAZUJÍCÍ VÝZKUM

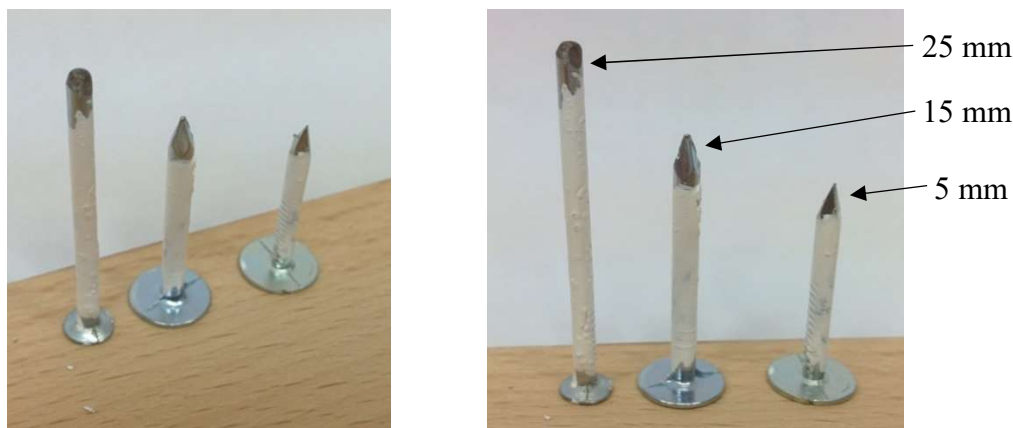
### H.1 Rozšíření experimentu EXF

Pro rozšíření studia chování vody na povrchu dřevěných vzorků byl vytvořen navazující experiment, pomocí kterého se bude zjišťovat vlhkostní profil po výšce vzorku s tím, že vzorky budou orientovány v různých sklonech  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $45^\circ$  na (Obr. 92). Cílem experimentu je stanovit jak dlouho bude atmosférická srážka ovlivňovat měřenou vlhkost s důrazem na povrch vzorku. Tyto hodnoty následně lze implementovat do numerických modelů a tím zpřesnit jejich výsledky.



Obr. 92: Sklon zkušebních těles. Zdroj autor.

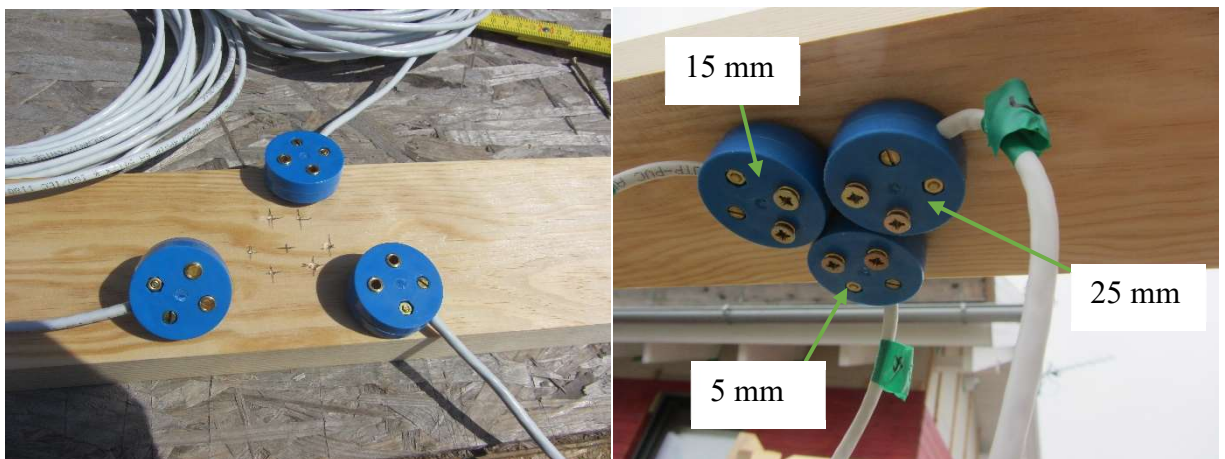
Vzorky jsou z borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* L.) pro porovnání rozdílnosti možného chování na povrchu vzorku. Rozměr vzorku je  $100 \times 30 \times 600$  mm. Na každém vzorku jsou umístěna tři čidla, která měří celý vlhkostní profil ve středu vzorku. Dále je na každém vzorku umístěno jedno čidlo, které měří vlhkost ve středu tloušťky vzorku, toto čidlo slouží jako referenční měření k porovnání správnosti měření. Měření probíhá v hloubce 5, 15 a 25 mm. K měření jsou využita teplotně vlhkostní čidla od firmy Elbez, která jsou zobrazena na (Obr. 94). Čidla jsou ukotvena pomocí hřebů. Hřeby na (Obr. 93) jsou opatřeny nátěrem, který eliminuje měření mimo požadovanou hloubku.



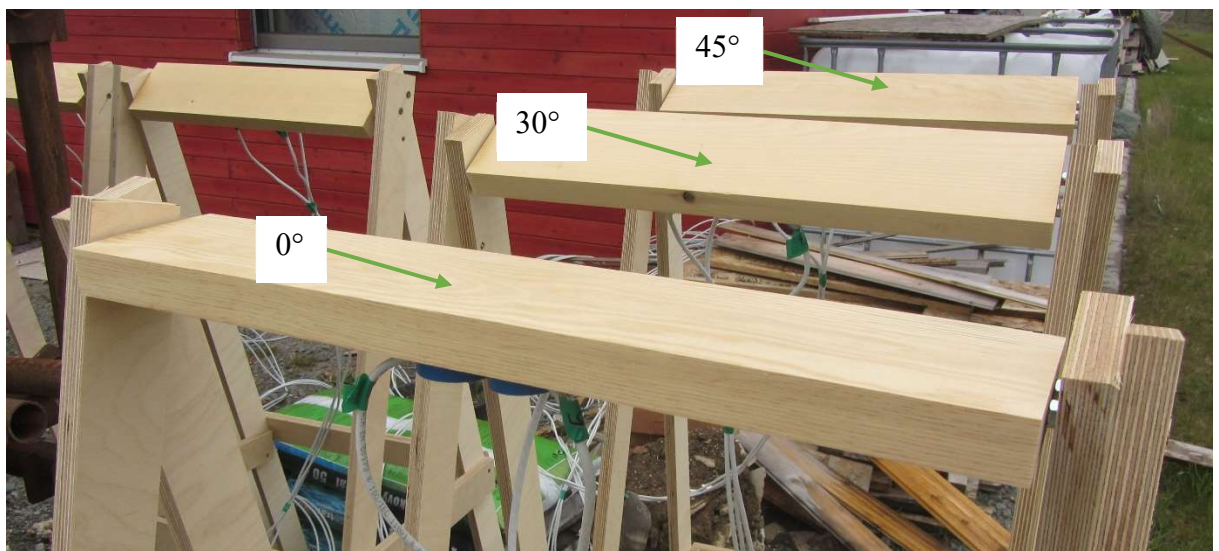
Obr. 93: Kotvící hřeby opatřené nátěrem pro tepelně izolační čidla.

Osazení čidel je zobrazeno na (Obr. 94), s označením pro jakou hloubku jsou použity. Otvor pro vruty byl předvrtán, aby nedošlo k poškození nátěru a tedy i zkreslení výsledků měření. Předvrtané otvory jsou vidět na s (Obr. 94).

Měření se předpokládá jako dlouhodobé měření s trváním přibližně 3 let. Pro následnou numerickou analýzu je v místě realizace tohoto experimentu ve výzkumném centru AdMaS umístěná meteorologická stanice se záznamem klimatických dat. Pohled na vzorky je na (Obr. 95).



Obr. 94: Teplotně vlhkostní čidla.

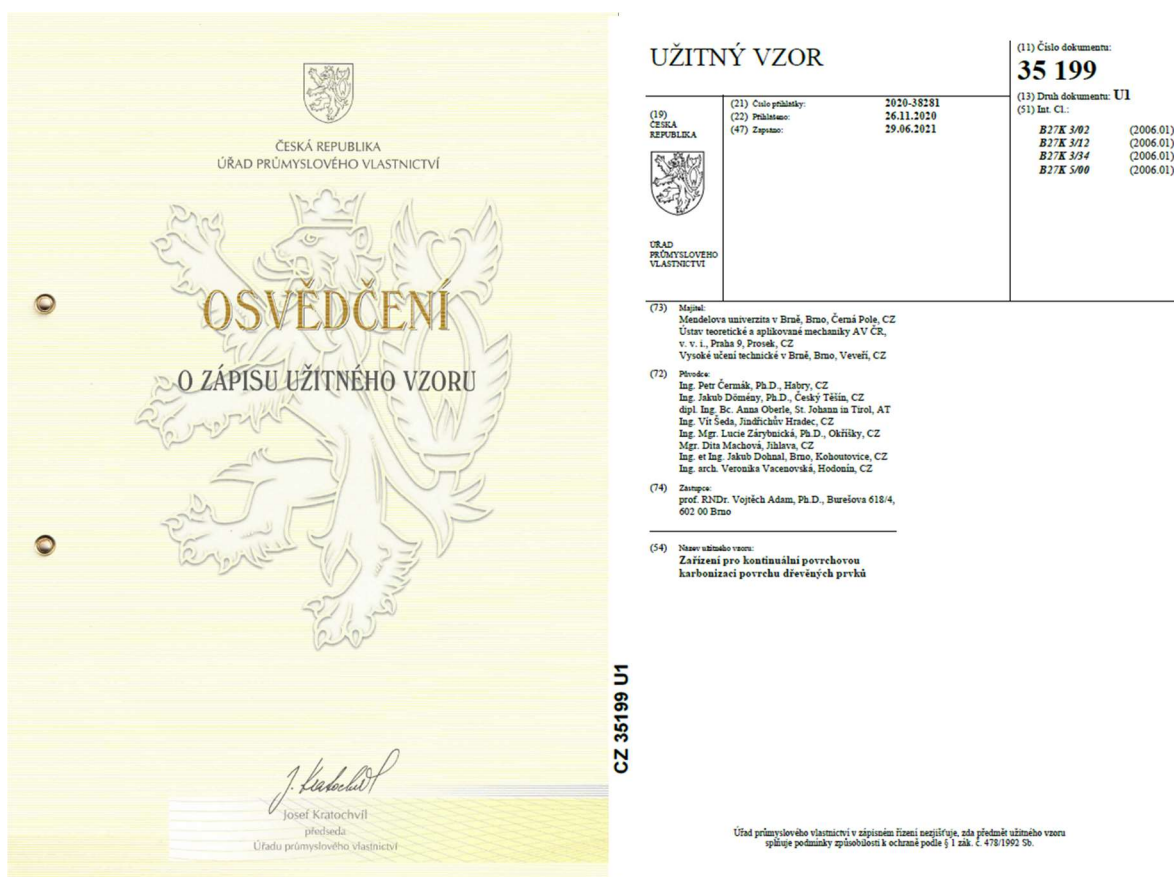


Obr. 95: Pohled na vzorky.

## H.2 Technologická agentura České republiky (TAČR)

Autor disertační práce je součástí výzkumného týmu, který provádí výzkum v rámci projektu TAČR ve výzvě zéta. Výzkumný projekt TJ02000072 – Vývoj technologie karbonizace povrchu dřevěných prvků staveb: eliminace vlhkostních a biodegradačních vlivů je řešený Mendelovou univerzitou v Brně, Vysokém učení technickém v Brně a Akademií věd České republiky.

Výsledkem tohoto výzumu byl jeden zahraniční konferenční příspěvek prezentovaný online na konferenci WWD 2021, který je uvedený v kapitole: M Seznam publikovaných článků, jako článek [L], dále byly publikovány dva články s IF 4,329 pa to článek [M] a [N]. Posledním výstupem byl schválený užitný vzor pro zařízení pro kontinuální povrchovou karbonizaci povrchu dřevěných prvků zobrazený na (Obr. 96).



Obr. 96: Užitný vzor.

## I SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Abaqus: Abaqus/Standard, User's Manual. Version 6.14. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket (2014),
- [2] Adsorpce z kapaln e 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\\_plynnne\\_faze\\_na\\_tuhe\\_latce.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpce_z_plynnne_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/adsorpce\\_hystereze.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpce_hystereze.html).
- [5] ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide: Release 14.5 [online]. Southpointe, USA: ANSYS, Inc., 2012, 380 s. [cit. 2017-07-06].
- [6] ANTON, O., BLAŽKOVÁ, V., HOBST, L., MĚŘENÍ VLHKOSTI V PRAXI SOUDNÍHO INŽENÝRA. *Soudní inženýrství*. 2005, 16(3), 4.
- [7] BERGMAN, R., Z. CAI, Ch. G. CARLL, C. A. CLAUSEN, M. A. DIETENBERGER, R. H. FALK, Ch. R. FRIHART, S. V. GLASS, Ch. G. HUNT, R. E. IBACH, D. E. KRETSCHMANN, D. R. RAMMER, R. J. ROSS a N. M. STARK. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material (All Chapters)*. Forest Products Laboratory. Wood handbook – Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.
- [8] BERTHELOT, J. M. *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. New York: Springer, 1999, XXV, 645 s. Mechanical engineering series (Berlin, Germany). ISBN 03-879-8426-7.
- [9] BISHARA, N., VOGELANG, S., PLAGGE, R., Numerical Simulation of the Hygrothermal Behavior of a New Solid Wood Panel for Room Temperature Control – Calibration of the Heating Curve, *Energy Procedia*, Volume 78, 2015, Pages 176-182, ISSN 1876-6102.
- [10] BITTNER, Z. Numerické metody mechaniky 1. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992, 309 s. ISBN 80-010-0855-X.
- [11] 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/>
- [12] BRADSHAW, S.M., E.J. van WYK a J.B. de SWARDT. Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1998, s. 202-212. Dostupné z: <http://www.saimm.co.za/Journal/v098n04p201.pdf>.

- [13] BRÉMAUD, I., GRIL, J.; THIBAUT, B., Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 2011, 45.4: 735-754.
- [14] BRUMOVSKÝ M., RADA, O. *Dřevo v rekreačním objektu*. Praha: Brázda, 1991. ISBN 80-209-0187-6.
- [15] BUCUR, V. *Acoustics of wood*. 2nd ed. New York: Springer, 2006, XVIII, 393 s. ISBN 987-354-0261-230.
- [16] Catman Data Acquisition Software – More than just Data Acquisition [online]. Darmstadt: Company Headquarters, 2000 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/>
- [17] ČERMÁK, P. -- VAHTIKARI, K. -- RAUTKARI, L. -- LAINE, K. -- HORÁČEK, P. -- BAAR, J. The effect of wetting cycles on moisture behaviour of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Journal of Materials Science*. 2016. sv. 51, č. 3, s. 1504--1511. ISSN 0022-2461.
- [18] ČSN 49 0103 (490103) *Dřevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1979.
- [19] ČSN 73 0540-2, *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [20] ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995.
- [21] ČSN 73 0831 *Požární bezpečnost staveb – Shromažďovací prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [22] ČSN 73 0833 *Požární bezpečnost staveb – Budovy pro bydlení a ubytování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996.
- [23] ČSN 73 2824-1 (732824) *Třídění dřeva podle pevnosti - Část 1: Jehličnaté řezivo*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2015.
- [24] ČSN 74 4505 (744505) *Podlahy. Společná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [25] ČSN EN 1310 (480206) *Kulatina a řezivo - Metody měření vad*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [26] ČSN EN 13183-1 (491016) *Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
- [27] ČSN EN 13183-2 (491016) *Vlhkost vzorku řeziva - Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [28] ČSN EN 384 (73 1712). *Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2010.
- [29] ČSN EN 408 (73 1741). *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [30] ČSN EN ISO 12570 - *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

- [31] 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.
- [32] 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.cec483e8062ca1dc24ea807f0d5ba7df>.
- [33] Dřevo - základní fyzikální vlastnosti dřeva. *VŠB, Zkoušení stavebních materiálů a výrobků - Dřevo* [online]. Ostrava: VŠB, 2010 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo\\_zk](http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zk).
- [34] 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/HUdreva/2.pdf](http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/2.pdf).
- [35] *EARCH: Barevný svět architektury* [online]. Helsinky: EARCH, 2012 [cit. 2017-08-08]. Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/architektura/kaple-ticha-kamppi>.
- [36] ECMWF: ERA-Interim. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* [online]. UK: ECMWF, 2017 [cit. 2017-03-02]. Available from: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>.
- [37] *Elektromagnetické pole* [online]. Praha: ZCU, 2005 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: <http://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYA2/elmg.pole.pdf>.
- [38] *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: Multimedialní Encyklopedie Fyziky, 2006 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/937-urcovani-casu#>
- [39] *ERA-Interim* [online]. UK: ECMWF, 2017 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z: <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>.
- [40] *ESTAV.CZ* [online]. Praha: Topinfo, 2017 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/5344.nejvyssi-bytova-drevostavba-na-svete-stoji-v-norsku>
- [41] FORTINO S., GENOESE A., GENOESE A., NUNES L., PALMA P. (2013). Numerical modelling of the hygro-thermal response of timber bridges during their service life: A monitoring case-study. *Construction and Building Materials*. Vol. 47, 1225- 1234. doi-link: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.009.
- [42] FORTINO, S., HRADIL, P., SALMINEN, L., MAGISTRIS, F., A 3D micromechanical study of deformation curves and cell wall stresses in wood under transverse loading. *Journal of Materials Science*. 2015, 50(1), 482-492. DOI: 10.1007/s10853-014-8608-2. ISSN 0022-2461. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-014-8608-2>
- [43] 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.

- [44] FRAGIACOMO, M., FORTINO, S., TONONI, D., USARDI, I., TORATTI, T., Moisture-induced stresses perpendicular to grain in timber sections exposed to European climates. *Engineering Structures* 33 (2011), 3071-3078.
- [45] 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.
- [46] GAŠPARÍK, M. MACKŮ, J., Sušení dřeva. *AGROjournal: stroje a zařízení, technologie, výstavba, úspora nákladů*. Hradec Králové: VEGA, 2015, 2.(3), 7. ISSN 2464-5230.
- [47] Google: Scholar. *Google Scholar: Studujte na ramenou obrů* [online]. USA: Google, 1990 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://scholar.google.cz/>.
- [48] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., 2000: PHYSICS-4. ELECTROMAGNETIC WAVE OPTICS -Relativita. Brno: VUTIUM, 1278 pp, ISBN 80-214-1868-0. (In Czech).
- [49] HANHIJÄRVI, A. 1995. Modelling of creep deformation mechanisms in wood. Espoo: Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 231. 143 p. + app. 3 p. Dissertation.
- [50] HAVÍŘOVÁ, Z. *Dům ze dřeva*. Brno: ERA Group, 2006. ISBN 80-7366-008-3.
- [51] HIRŠ, J., JANÍKOVÁ, H., MOHAPL M., ŠAŠINKA, O., Měření úniků tepla u dřevostaveb z masivu. *Dřevo & stavby*. 2010, 2009(6), 7.
- [52] Historie jinak. *Zpracování kovů | Historie jinak* [online]. Nasavrky: Boii o.s., 2012 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.historiejinak.cz>.
- [53] 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>.
- [54] HLADÍK, P., *Historický vývoj použití dřeva v konstrukcích*. Brno, 2006. Bakalářská práce. Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [55] HOFSTETTER, K., GAMSTEDT, E. K. (2009). Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture. *Holzforschung*, 63(2), 130–138. <http://doi.org/10.1515/HF.2009.018>.
- [56] HOFSTETTER, K., HELLMICH, C., EBERHARDSTEINER, J. (2006). Continuum micromechanics estimation of wood strength. *Pamm*, 6(1), 75–78. <http://doi.org/10.1002/pamm.200610020>.
- [57] *Home Search form Search Vihantasalmi Bridge* [online]. Helsinki: Puuinfo, 2000 [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: <https://www.woodarchitecture.fi/projects/vihantasalmi-bridge>.
- [58] HORÁČEK, P.; FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA I. BRNO, MZLU V BRNĚ, 1998, 128 s., ISBN 80-7157-347-7.
- [59] HORSKÝ, J., ŠRUBAŘOVÁ, P., Měření vlhkosti betonu na mostovkách. *Mosty.cz* [online]. 2012, 12.(1), 8 [cit. 2017-06-13]. ISSN 1213-6395. Dostupné z:

- <http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=3108>
- [60] HOUDEK, D., KOUDELKA, O., *SRUBOVÉ DOMY Z KULATIN*. 2. Brno: Era, 2007. ISBN 80-7366-064-4.
- [61] HOUŠKA, P., Držme se tradičních nátěrů!. *Dřevo & stavby, sruby & roubenky*. Praha: PRO VOBIS, 2012, (3/2012).
- [62] 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)
- [63] Chemická stavba dřeva. *Kačenka web* [online]. Uherské Hradiště: Kačenka web, 2001 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://kacenska.web2001.cz/>
- [64] Chemické složení dřeva - Dřevo centrum: komplexní informace o dřevě a jeho použití. *Dřevo centrum* [online]. Praha: Dřevo centrum, 2010 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/>.
- [65] Chemistry Learning: Free Online Education Resource. *Chemistry Learning: Adsorption Isotherm* [online]. USA: Xamplified, c2017 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: <http://www.chemistrylearning.com/>.
- [66] ISAKSSON, T.; THELANDERSSON, S., Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications. *Building and Environment*, 2013, 59: 239-249,
- [67] *Jiná tesařina: výroba dřevěných konstrukcí jinak ...* [online]. Bystrá nad Jizerou: Jiná tesařina, 2014 [cit. 2017-06-19]. Dostupné z: <http://www.jinatesarina.cz/otesavani/teorie.php>
- [68] KOLEKTIV AUTORŮ. *Dřevařská technická příručka*. Praha: MÍR, novinářské závody, n. p., 1970. ISBN 04-821-70.
- [69] KOŇAS, P., HORÁČEK, P., GRYC, V., TIPPNER, J., & ZEJDA, J. Christmas tree. *Proceedings of 3 Syposium Interaction of Wood with Various Forms of Energy*, 131-137.
- [70] 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,
- [71] LABONNOTE, N., *Damping in Timber Structures*. Trondheim, 2012. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Structural Engineering.
- [72] LANGENBACH, R., Resisting earth's forces: typologies of timber buildings in history. *Structural Engineering International*, 2008, 18.2: 137-140.
- [73] *Lexikon dřev - Stavba dřeva: Anatomická stavba dřeva* [online]. Brno: Ústav nauky o dřevě, Mendlova lesnická a zemědělská univerzita, 2002 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z: [http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/index.htm](http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/index.htm)

- [74] Liang, S.-Q., and Fu, F. (2007). "Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber," *Journal of Forestry Research* 18(4), 309-312
- [75] LUND FRANDSEN, H. SVENSSON, S., (2007). Implementation of sorption hysteresis in multi-Fickian moisture transport. *Holzforschung*, 61(6), pp. 693-701. Retrieved 19 Aug. 2017, from doi:10.1515/HF.2007.113.
- [76] MANDELBROT, BENOIT B., *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W.H. Freeman, c1982. ISBN 07-167-1186-9.
- [77] MASCIA, N. T., LAHR, F. A. R., Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood. *Material Research*. 2006, roč. 9, č. 3, s. 301–310. [cit. 2017-09-03] Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v9n3/31790.pdf>.
- [78] MATOVIČ, A., *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*, vydání první, Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993, 212s., ISBN 80- 7157-086-9.
- [79] *Maxwellovy rovnice, elektromagnetické vlnění* [online]. Praha: Praha, 2010 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: [http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/4\\_Elektrina\\_a\\_magnetismus/7\\_Elektrina\\_a\\_magnetismus\\_v\\_praxi/4705\\_Maxwellovy\\_rovnice\\_elektromagneticke\\_vlneni.pdf](http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/4_Elektrina_a_magnetismus/7_Elektrina_a_magnetismus_v_praxi/4705_Maxwellovy_rovnice_elektromagneticke_vlneni.pdf).
- [80] 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.
- [81] *MIT: Elektřina a magnetismus* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2002 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz\\_13\\_maxw.pdf](http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_13_maxw.pdf).
- [82] 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.
- [83] *MYKOS - mikrovlny, vysoušení, likvidace dřevomorky* [online]. Třinec: MYKOS, c2012 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.mykos.cz/bezpecnost-mikrovlny/>
- [84] NASSWETTROVÁ, A., NIKL, K., ZEJDA, J., KLEPÁRNÍK, J., THE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF HIGHFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD HOMOGENEITY BY MECHANICAL HOMOGENIZERS WITHIN THE SPACE OF WOOD MICROWAVE HEATING DEVICE. *Wood research*. Bratislava, 2013, 58(1), 11-24. ISSN 1336-4561.
- [85] 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.
- [86] 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>.

- [87] 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.
- [88] NOGOVÁ, T., *Hodnocení metod pro stanovení vlhkosti ve stavebních konstrukcích*. Brno, 2015. Diplomová práce. VUT FAST v Brně. Vedoucí práce Antonín Žák.
- [89] NOVOTNÝ, M., ŠUHAJDA, K., SOBOTKA, J., GINTAR, J., ŠUHAJDOVÁ, E., USE OF MICROWAVE RADIATION IN BUILDING INDUSTRY THROUGH APPLICATION OF WOOD ELEMENT DRYING. *Wood research*. Bratislava, 2014, 59(3), 389-400. ISSN 1336-4561.
- [90] OBATAYA, E.; HIGASHIHARA, T.; TOMITA, B. Hygroscopicity of heat-treated wood, 3: Effect of steaming on the hygroscopicity of wood. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*, 2002.
- [91] OBATAYA, E.; TOMITA, B. Hygroscopicity of heat-treated wood, 2: Reversible and irreversible reductions in the hygroscopicity of wood due to heating. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*, 2002.
- [92] OK Pyrus. *Sruby OK Pyrus Brno | Roubenky, srubové domy* [online]. Brno: OK Pyrus, 2013 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.okpyrus.cz/>.
- [93] Ormarsson, S. 1999. Numerical analysis of moisture-related distortions in sawn timber. Chalmers University of Technology. Dissertation.
- [94] PÁNEK, M., Poškození dřevěných konstrukcí biotickými a atmosférickými činiteli. *Materiály pro stavbu*. Business Media CZ, 2015, 21.(3.), 48-51. ISSN 1213-0311.
- [95] PĚNČÍK J., *Dřevěné segmentové schodiště s jednostranně zavěšenými stupni*. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2013. 185 s.
- [96] Pevnost dřeva. *Mendlova univerzita Brno* [online]. Brno: Mendlova univerzita Brno, 2007 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9190](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9190)
- [97] *Počítačová chemie* [online]. Praha: Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT, 2012 [cit. 2017-07-21]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/kolafa/mikro12.8.pdf>
- [98] POCHMANOVÁ, P., MISAR, I., Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah. *TZB-INFO* [online]. 2011, 2.(1), 6 [cit. 2017-06-13]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>.
- [99] POUSETTE, A., MALO, K., THELANDERSSON, S., FORTINO, S., SALOKANGAS, L., & WACKER, J. (2017). Durable timber bridges: Final report and guidelines. RISE Research Institutes of Sweden. SP Rapport Vol. 25 <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1116787/FULLTEXT01.pdf>
- [100] POŽGAJ, A. CHOVANEC, D. KURJATKO, S. BABIAK, M.; *Štruktúra a vlastnosti dreva*, Bratislava, 1997, 488 s., ISBN 80-07-00960-4.
- [101] *Přehled pravděpodobnostních rozdělení* [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova, 2009 [cit. 2018-08-18]. Dostupné z: <http://www.karlin.mff.cuni.cz/~pesta/NMFM301/rozdeleni.pdf>

- [102] ROSENKILDE, A. ARFVIDSSON, J. (2009). Measurement and Evaluation of Moisture Transport Coefficients During Drying of Wood. *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 51(4), pp. 372-380. Retrieved 9 Aug. 2017, from doi:10.1515/hfsg.1997.51.4.372.
- [103] *Slovník cizích slov online* [online]. Brno: slovník cizích slov online, c2015-2017 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: <http://www.slovník-cizich-slov.cz/>.
- [104] Sruby Pacák. *Sruby Pacák* [online]. Frýdek-Místek: Sruby Pacák, 2010 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.srubypacak.cz/>.
- [105] 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/>.
- [106] SZÁNTÓ, L., Maxwellovy rovnice: a jejich názorné odvození. 2. Praha: BEN - technická literatura, 2012. ISBN 978-80-7300-450-7.
- [107] ŠMIŘÁK, S. *Pružnost a plasticita I: pro distanční studium*. Vyd. 3., V Akademickém nakl. CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 210 s. ISBN 80-720-4468-0.
- [108] ŠUHAJDA, K., *Analýza interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva*. Brno, 2016, 165 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [109] ŠUHAJDA, K., *Analýza interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva: Teze habilitační práce*. Vysoké učení technické v Brně. Brno: VUTIUM Brno, 2016. ISBN 978-80-214-5433-0.
- [110] ŠUHAJDOVÁ, E. *Experimentální výzkum v oblasti lepených lamelových prvků na bázi listnatých klimatolerantních dřevin*. Brno, 2020. Disertační práce. VUT FAST v Brně.
- [111] *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2010 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: [http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/882?view\\_gf\\_cilove\\_skupiny=](http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/882?view_gf_cilove_skupiny=)
- [112] The History Reader. *Log Cabin History: The Secrets of Making a Home* [online]. London: Modern History, 2015 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.thehistoryreader.com>.
- [113] The Wood Database. *The Wood Database* [online]. USA: Center for Wood Anatomy Research, c2008-2016 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>.
- [114] THIBAUD, S., CHARRIER, F., MALVESTIO, J., CHARRIER, B., MOUBARIK, A., CASTÉRA, P., GRELIER, S., (2012). Physical properties and termite durability of maritime pine *Pinus pinaster* Ait., heat-treated under vacuum pressure. *Wood Science and Technology - WOOD SCI TECHNOL*. 46. 10.1007/s00226-011-0421-3.
- [115] TONONI, D., USARDI, I., *Moisture transfer and moisture induced stresses in timber structures under environmental conditions in Europe*. Italy, 2010. Master thesis. University of Brescia.
- [116] TORATTI, T., *Modelling the creep of timber beams*. *Rakenteiden Mekaniikka*. 1992, 25(1), 24.

- [117] *Transport látky* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2011 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz\\_chem/web/dynamika/transport.htm](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/dynamika/transport.htm)
- [118] VENHODOVÁ, E., *VLASTNOSTI DŘEVA RŮZNÉHO STÁŘÍ S OHLEDEM NA TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT, FAST v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D..
- [119] Vlhkost dřeva. *Mendlova univerzita Brno* [online]. Brno: Mendlova univerzita Brno, 2007 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9177](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177).
- [120] VYKUTIL, J., *Teorie chyb a vyrovnávací počet*. Brno: Vysoké učení technické, 1984. Učební texty vysokých škol.
- [121] VÝROBA A TŘÍDY MATERIÁLU THERMOWOOD®. DŘEVĚNÉ FASÁDY A TERASY Z MASIVU ThermoWood® [online]. Opava-Kateřinky: PROKOM R&S, [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://fasady-terasy-thermowood.cz/zajimavosti/vyroba-a-tridy-materialu-thermowood-b100.html>
- [122] YOUNSI, R., D. KOCAEFE, S. PONCSAK a Y. KOCAEFE. Transient Multiphase Model for the High-Temperature Thermal Treatment of Wood. *AICHE Journal*. American Institute of Chemical Engineers, 2006, 52(7), 10. DOI: 10.1002/aic.10860. ISSN 1547-5905.

## J SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### J.1 Seznam vybraných neznámých

$\alpha$	opravný koeficient
$a$	vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou při ohybové zkoušce v [mm]
$A$	plocha v [m <sup>2</sup> ]
<b>B</b>	vektor magnetické vlny
<b>C</b>	matice tuhosti materiálu
$c$	koncentrace procházející látky v [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_b$	koncentrace vázané vody
$c_v$	koncentrace vodní páry
$c_v'$	koncentrace vodní páry na základě objemu buňky
$c_v^a$	koncentrace vodní páry okolního prostředí
$c_w$	specifické teplo
$c_\lambda$	rychlost šíření vlny [m/s]
<b>D</b>	matice difúze
<b>D<sub>b</sub></b>	difúzní tenzor pro vodu
$D_L$	difúze v podélném směru
$D_R$	difúze v radiálním směru
$D_T$	difúze v tangenciálním směru
<b>D<sub>v</sub></b>	difúzní tenzor pro vodní páru
$E$	Yongův modul pružnosti [Pa]
<b>E</b>	vektor elektrické vlny
$E_1, E_2, E_3$	Yongův modul pružnosti pro roviny 1, 2 a 3 [Pa]
$E_m$	lokální modul pružnosti dřeva v [Pa]
$E_{m,l}$	lokální modul pružnosti v ohybu v [Pa]
$E_w$	skutečný modul pružnosti dřeva v [Pa] při vlhkosti $w$ [%]
$f$	frekvence mikrovlnného záření [Hz]
$F$	difúzní tok v [kg/m <sup>2</sup> s]
$F_1, F_2$	zatížení [kN]
$f_{c,0}$	pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [Pa]
$f_m$	pevnost v ohybu [Pa]
$F_{max}$	největší zatížení [kN]
$F_{max,est}$	odhadnuté největší zatížení [kN]
$G$	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$G_{12}, G_{23}, G_{13}$	modul pružnosti ve smyku pro roviny 12, 23 a 13 [Pa]

<b>H</b>	vektor magnetické intenzity
$h_b$	specifická entalpie vázané vody
$h_{bv}$	specifická entalpie přechodu od vody vázané k vodní páře
$h_v$	specifická entalpie vodní páry
$I$	modul setrvačnosti průřezu v [mm <sup>4</sup> ]
$j$	hustota elektrického proudu
<b>K</b>	tenzor tepelné vodivosti
$k_p$	koeficient emisí pro kryté dřevo
$k_v$	koeficient povrchové emise pro vodní páru
$k_v$	součinitel přenosu hmoty toku vodních par
$k_{vs}$	koeficient emisí pro nekryté dřevo
$l$	délka zkušební tělesa v [mm]
$\lambda_L$	koeficient podélné difúze [-]
$\lambda_R$	koeficient radiální difúze [-]
$\lambda_T$	koeficient tangenciální difúze [-]
$M$	molární hmotnost [kg/mol]
$m_0$	hmotnost absolutně vysušeného tělesa [g]
$m_1$	hmotnost zkušební tělesa [g]
$N$	Avogadrova konstanta $N = 6,025 \cdot 10^{23}$ [mol <sup>-1</sup> ]
$p_{vs}$	tlak nasycených vodních par
$R$	hodnota spolehlivosti
<b>S</b>	matice poddajnosti materiálu
$S_{paint}$	koeficient nátěru nebo jiné ochrany
$t$	teplota okolního vzduchu v [°C]
$T$	teplota v [K]
$t_{2m}$	teplota měřená ve dvou metrech na povrchem
$t_{dp2m}$	teplota rosného bodu měřená ve dvou metrech na povrchem
$w$	vlhkost v [%]
$W$	ohybový moment v [mm <sup>3</sup> ]
$W(\varepsilon)$	deformační energie [Pa]
$W^*(\sigma)$	hustota komplementární energie [Pa]
$w_1, w_2$	deformace [mm]
$w_{abs}$	absolutní vlhkost [%]
$w_{air}$	rovnovážná vlhkost v [%]
$w_m$	vlhkost molekulární sorpce [%]
$w_m$	vlhkost molekulární sorpce [%]
$w_{max}$	maximální vlhkost - nasákavasot [%]
$w_{rel}$	relativní vlhkost [%]

$w_{surf}$	obsah vlhkosti na povrchu
$x$	vzdálenost v [m]
$\boldsymbol{\varepsilon}$	vektor deformace
$\boldsymbol{\varepsilon}_0$	vektor počáteční deformace
$\varepsilon_0$	permitivita vakua [F/m]
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{12}$	deformace v rovinách 1, 2, 3, 23, 13 a 12
$\varepsilon_r$	permitivita prostředí [F/m]
$\lambda$	vlnová délka [m]
$\mu_0$	permeabilita vakua [H/m]
$\mu_r$	permeabilita prostředí [H/m]
$\nu$	Poissonův součinitel příčné deformace [-]
$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$	Poissonův součinitel příčné deformace pro roviny 12, 23, a 13 [-]
$\rho_s$	hustota dřevní substance [kg/m <sup>3</sup> ]
$\boldsymbol{\sigma}$	vektor napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	normálová napětí v rovinách 1, 2 a 3
$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{13}$	smyková napětí v rovinách 12, 23 a 13
$\sigma_w$	skutečná pevnost dřeva v [Pa] při vlhkosti $w$ [%]
$\tau$	čas v [s]

## J.2 Seznam zkratek

$BNV$	bod nasycených vláken
EMW	elektromagnetické mikrovlnné vlnění (záření)
$L$	podélný směr
MKP	metoda konečných prvků
$MNBS$	mez nasycení buněčných stěn
MOE	modul pružnosti v ohybu
MOR	pevnost v ohybu
$R$	radiální směr
$M_{BNV}$	relativní vlhkost dřeva rovna bodu nasycených vláken
$T$	tangenciální směr

## K SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>OBR. 1: PRVNÍ DŘEVĚNÉ OBYDLÍ, A) PRVNÍ TYP NEJEDNODUŠŠÍCH STAVEB, B) STAVBA S KOŽEŠINAMI NA POVRCHU. PŘEVZATO Z [105].</b>	<b>9</b>
<b>OBR. 2: STARÁ ROUBENKA VE VALAŠSKÉM MUZEU V PŘÍRODĚ V ROŽNOVĚ POD RADHOŠTĚM. ZDROJ AUTOR.</b>	<b>10</b>
<b>OBR. 3: DŘEVOSTAVBA NA KAMENNÝCH PILÍŘÍCH VE FINSKU. ZDROJ AUTOR.</b>	<b>10</b>
<b>OBR. 4: RODINNÝ SRUB V JIHLAVĚ. ZDROJ AUTOR.</b>	<b>11</b>
<b>OBR. 5: KAPLE TICHÁ V HELSINKÁCH, FINSKO, A) JE FOTOGRAFIE Z EXTERIÉRU A, B) JE FOTOGRAFIE Z INTERIÉRU. ZDROJ AUTOR.</b>	<b>12</b>
<b>OBR. 6: SENDVIČOVÁ ROUBENÁ KONSTRUKCE. PŘEVZATO Z [92].</b>	<b>13</b>
<b>OBR. 7: NEJVYŠŠÍ DŘEVĚNÝ BYTOVÝ DŮM NA SVĚTĚ K ROKU 2017, BERGEN NORSKO. PŘEVZATO Z [40].</b>	<b>14</b>
<b>OBR. 8: POČTY ČLÁNKŮ SE SLOVNÍM SPOJENÍM „WOOD MOISTURE“ V LETECH 1996 – 2018. PŘEVZATO Z [47].</b>	<b>15</b>
<b>OBR. 9: STAVBA JEHLIČNATÉHO A) A LISTNATÉHO B) DŘEVA. PŘEVZATO Z [34] A DOPLNĚNO.</b>	<b>17</b>
<b>OBR. 10: RADIÁLNÍ ŘEZ S VIDITELNÝMI LETOKRUHY A PATRNÝM ROZDÍLEM JÁDROVÉHO A BĚLOVÉHO DŘEVA. DŘEVO BOROVICE LESNÍ (<i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.). ZDROJ AUTOR.</b>	<b>18</b>
<b>OBR. 11: RADIÁLNÍ ŘEZ BĚLOVÝM DŘEVEM BŘÍZY BĚLOKORÉ (<i>BETULA PENDULA</i> L.). ZDROJ AUTOR.</b>	<b>19</b>
<b>OBR. 12: KŘIVKY HYGROSKOPICKÉ ROVNOVÁHY DŘEVA. PŘEVZATO Z [34].</b>	<b>20</b>
<b>OBR. 13: ADSORPČNÍ IZOTERMA, ADSORPČNÍ IZOBARA A ADSORPČNÍ IZOSTERA. PŘEVZATO Z [3].</b>	<b>22</b>
<b>OBR. 14: ADSORPČNÍ IZOTERMA S HYSTERÉZNÍ SMYČKOU. PŘEVZATO Z [4].</b>	<b>23</b>
<b>OBR. 15: RŮZNÉ TVARY PÓRŮ A TOMU ODPOVÍDAJÍCÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKA. PŘEVZATO Z [4].</b>	<b>23</b>
<b>OBR. 16: RŮZNÉ TVARY PÓRŮ A TOMU ODPOVÍDAJÍCÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKA. PŘEVZATO Z [4].</b>	<b>24</b>
<b>OBR. 17: GRAFICKÝ PRŮBĚH VLHKOSTI <math>W_{AIR} = 70\%</math> PRO ROZDÍLNÉ TEPLoty.</b>	<b>25</b>
<b>OBR. 18: GRAFICKÝ PRŮBĚH <math>W_{AIR}</math> PRO <math>T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}</math>.</b>	<b>26</b>
<b>OBR. 19: SORPČNÍ IZOTERMA BEZ HYSTEREZE.</b>	<b>27</b>

<b>OBR. 20: HAILWOOD – HARROBINOVA IZOTERMA S HYSTEREZÍ. ....</b>	<b>28</b>
<b>OBR. 21: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ OBSAHU VODY VE STRUKTUŘE VODY A) POUZE CHEMICKY VÁZANÁ VODA, B) VODA VÁZANÁ A C) VODA VÁZANÁ I VOLNÁ. ....</b>	<b>30</b>
<b>OBR. 22: ZÁKLADNÍ ŘEZY DŘEVEM. PŘEVZATO A UPRAVENO Z [34]. ....</b>	<b>32</b>
<b>OBR. 23: OBECNÁ PRAVOÚHLÁ SOUSTAVA SOUŘADNIC 123 (A) A PRAVOÚHLÁ SOUSTAVA SOUŘADNIC XYZ (B) A LTR (C). PŘEVZATO A UPRAVENO Z [95]. ....</b>	<b>33</b>
<b>OBR. 24: MOŽNOSTI NAŘEZÁNÍ DŘEVA. PŘEVZATO Z [93]. ....</b>	<b>33</b>
<b>OBR. 25: DEFORMACE DŘEVA PŘI VYSOUŠENÍ V RŮZNÝCH ČÁSTECH KLÁDY. PŘEVZATO Z [33]. ....</b>	<b>34</b>
<b>OBR. 26: DEFORMACE STŘEDNÍ ČÁSTI KMENE PŘI ROZŘEZÁNÍ NA PRKNA. PŘEVZATO A UPRAVENO Z [46]. ....</b>	<b>34</b>
<b>OBR. 27: POZICE PRO MĚŘENÍ VLHKOSTI VPICHOVÝM VLHKOMĚREM. 1 – ZARÁŽECÍ ELEKTRODA, 2 – PLOCHA, 3 – BOK, <math>T</math> – TLOUŠŤKA VZORKU, <math>W</math> – ŠÍŘKA MĚŘENÉHO VZORKU. PŘEVZATO A DOPLNĚNO ČSN EN 13183-2 [27].</b>	<b>40</b>
<b>OBR. 28: VLNOVÉ SPEKTRUM. PŘEVZATO Z [81]. ....</b>	<b>42</b>
<b>OBR. 29: ELEKTROMAGNETICKÁ VLNA – ELEKTRICKÁ E A MAGNETICKÁ SLOŽKA B VLNĚNÍ. PŘEVZATO Z [81]. ....</b>	<b>43</b>
<b>OBR. 30: MOLEKULA VODY A JEJÍ ORIENTACE V ELEKTRICKÉM POLI – SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ. PŘEVZATO A UPRAVENO Z [111]. ....</b>	<b>45</b>
<b>OBR. 31: POROVNÁNÍ DIFÚZNÍCH MODELŮ JÖNSSON A TORATTI V RADIÁLNÍM (<math>R</math>) A TANGENCIÁLNÍM (<math>T</math>) SMĚRU. ....</b>	<b>48</b>
<b>OBR. 32: EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY DIFÚZNÍHO MODELU NILSSON &amp; SANDBERG. PŘEVZATO Z [87]. ....</b>	<b>49</b>
<b>OBR. 33: DIFÚZNÍ MODEL NILSSON &amp; SANDBERG PRO VŠECHNY SMĚRY (<math>L</math>), (<math>R</math>) A (<math>T</math>). ....</b>	<b>51</b>
<b>OBR. 34: POROVNÁNÍ DIFÚZNÍCH MODELŮ V PODÉLNÉM (<math>L</math>) SMĚRU. ....</b>	<b>51</b>
<b>OBR. 35: POROVNÁNÍ TŘÍ DIFÚZNÍCH MODELŮ V RADIÁLNÍM (<math>R</math>) A TANGENCIÁLNÍM SMĚRU (<math>T</math>). ....</b>	<b>52</b>
<b>OBR. 36: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO VÝPOČET RELATIVNÍ VLHKOSTI VZDUCHU <math>W</math> Z TEPLoty VE 2 M A TEPLoty ROSNÉHO BODU. ....</b>	<b>57</b>
<b>OBR. 37: GLOBÁLNÍ SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM. ....</b>	<b>58</b>
<b>OBR. 38: LOKÁLNÍ CYLINDRICKÝ SYSTÉM. ....</b>	<b>58</b>
<b>OBR. 39: SUŠÁRNA MEMMERT UN. ....</b>	<b>62</b>
<b>OBR. 40: ANALYTICKÁ VÁHA KERN KB 360-3N. ....</b>	<b>62</b>

<b>OBR. 41: ZVLHČOVACÍ BOX.</b> .....	<b>63</b>
<b>OBR. 42: VNITŘNÍ ČÁST ZVLHČOVACÍHO BOXU.</b> .....	<b>64</b>
<b>OBR. 43: A) Z PRŮBĚHU VYSOUŠENÍ PRO SÉRII 3, B) GENERÁTOR ROMILL – ČELNÍ POHLED.</b> .....	<b>65</b>
<b>OBR. 44: TERMOKAMERA FLIR B425.</b> .....	<b>65</b>
<b>OBR. 45: ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍHO POLE PO DRUHÉ ČÁSTI VYSOUŠENÍ.</b> .....	<b>66</b>
<b>OBR. 46: DETAILNÍ ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍHO POLE.</b> .....	<b>66</b>
<b>OBR. 47: ZATĚŽOVACÍ SCHÉMA PRO ČTYŘBODOVÝ OHYB.</b> .....	<b>67</b>
<b>OBR. 48: ZKUŠEBNÍ PŘÍPRAVEK A ROZNÁŠECÍ PŘÍČNÍK.</b> .....	<b>68</b>
<b>OBR. 49: ZKUŠEBNÍ LIS FPZ 100/1 PŘI ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠCE NA ČTYŘBODOVÝ OHYB.</b> .....	<b>69</b>
<b>OBR. 50: ZKUŠEBNÍ LIS FPZ 100/1 PŘI ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠCE TLAKU ROVNOBĚŽNĚ S VLÁKNY.</b> .....	<b>71</b>
<b>OBR. 51: SUŠÁRNA MEMMERT UN 30.</b> .....	<b>72</b>
<b>OBR. 52: ZVLHČOVACÍ NÁDOBA.</b> .....	<b>73</b>
<b>OBR. 53: PRŮBĚH EXPERIMENTU VYSOUŠENÍM EMW.</b> .....	<b>74</b>
<b>OBR. 54: SCHÉMA VÝPOČTU MODULU DŘEVA V ABAQUS. PŘEVZATO Z [80] A UPRAVENO.</b> .....	<b>77</b>
<b>OBR. 55: UKÁZKA ČÁSTI VSTUPNÍCH DAT. NASTAVENÍ MATERIÁLOVÉHO MODELU.</b> .....	<b>80</b>
<b>OBR. 56: HISTOGRAM <i>B</i> ROZDĚLENÍ Z DAT PRO VÝPOČET RELATIVNÍ VLHKOSTI.</b> .....	<b>83</b>
<b>OBR. 57: HISTOGRAM <i>B</i> ROZDĚLENÍ Z DAT PRO VÝPOČET TEPLOTY.</b> .....	<b>84</b>
<b>OBR. 58: GRAF PRŮBĚHU RELATIVNÍ VLHKOSTI PRO STATISTICKÝ ROK.</b> .....	<b>85</b>
<b>OBR. 59: GRAF PRŮBĚHU TEPLOTY PRO STATISTICKÝ ROK.</b> .....	<b>86</b>
<b>OBR. 60: SÉRIE 1 SMRK ZTEPILÝ (<i>PICEA ABIES</i> L.).</b> .....	<b>87</b>
<b>OBR. 61: SÉRIE 1 BOROVICE LESNÍ (<i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.).</b> .....	<b>88</b>
<b>OBR. 62: SÉRIE 2 SMRK ZTEPILÝ (<i>PICEA ABIES</i> L.).</b> .....	<b>89</b>
<b>OBR. 63: SÉRIE 2 BOROVICE LESNÍ (<i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.).</b> .....	<b>90</b>
<b>OBR. 64: SÉRIE 3 SMRK ZTEPILÝ (<i>PICEA ABIES</i> L.).</b> .....	<b>91</b>
<b>OBR. 65: SÉRIE 3 BOROVICE LESNÍ (<i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.).</b> .....	<b>92</b>
<b>OBR. 66: MODEL Y POŠKOZENÍ PŘI ČTYŘBODOVÉM OHYBU.</b> .....	<b>93</b>
<b>OBR. 67: DRUHY POŠKOZENÍ PŘI TESTOVÁNÍ POMOCÍ ČTYŘBODOVÉHO OHYBU.</b> .....	<b>93</b>

<b>OBR. 68: MODELÝ POŠKOZENÍ PŘI TLAKU.....</b>	<b>94</b>
<b>OBR. 69: POŠKOZENÍ VE STŘEDNÍ ČÁSTI VZORKU.....</b>	<b>94</b>
<b>OBR. 70: POŠKOZENÍ VE SPODNÍ NEBO HORNÍ ČÁSTI.....</b>	<b>95</b>
<b>OBR. 71: VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK – LOKÁLNÍ MOE S VYZNAČENÍM NORMÁLNÍCH ROZDĚLENÍ PRO SÉRII 1 (ZELENÁ BARVA) AŽ PO SÉRII 3 (ŽLUTÁ BARVA) PRO SMRK ZTEPILÝ (<i>PICEA ABIES</i> L.).....</b>	<b>100</b>
<b>OBR. 72: VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK – LOKÁLNÍ MOE S VYZNAČENÍM NORMÁLNÍCH ROZDĚLENÍ PRO SÉRII 1 (ZELENÁ BARVA) AŽ PO SÉRII 3 (ŽLUTÁ BARVA) PRO BOROVIČI LESNÍ (<i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.). 101</b>	<b>101</b>
<b>OBR. 73: VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK – TLAK ROVNOBĚŽNĚ S VLÁKNY S VYZNAČENÍM NORMÁLNÍCH ROZDĚLENÍ PRO SÉRII 1 (ZELENÁ BARVA) AŽ PO SÉRII 3 (ŽLUTÁ BARVA) PRO SMRK ZTEPILÝ (<i>PICEA ABIES</i> L.). 102</b>	<b>102</b>
<b>OBR. 74: VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK – TLAK ROVNOBĚŽNĚ S VLÁKNY S VYZNAČENÍM NORMÁLNÍCH ROZDĚLENÍ PRO SÉRII 1 (ZELENÁ BARVA) AŽ PO SÉRII 3 (ŽLUTÁ BARVA) PRO BOROVIČI LESNÍ (<i>PINUS</i> <i>SYLVESTRIS</i> L.).....</b>	<b>103</b>
<b>OBR. 75: PRŮBĚH VLHKOSTI VYBRANÝCH VZORKŮ.....</b>	<b>104</b>
<b>OBR. 76: 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. 106</b>	<b>106</b>
<b>OBR. 77: PRŮMĚRNÁ VLHKOST SKUPIN VZORKŮ V PRŮBĚHU VYSOUŠENÍ. SKUPINA E DOSÁHLA 9. DEN HODNOTY 5 % A BYL PRO TUTO SKUPINU UKONČEN EXPERIMENT.....</b>	<b>107</b>
<b>OBR. 78: POŠKOZENÍ V KOLMÉM SMĚRU NA VLÁKNA. ....</b>	<b>108</b>
<b>OBR. 79: POŠKOZENÍ ROVNOBĚŽNÉ SE SMĚREM VLÁKEN. ....</b>	<b>108</b>
<b>OBR. 80: MĚŘENÝ VZOREK. PŘEVZATO Z [66].....</b>	<b>112</b>
<b>OBR. 81: UMÍSTĚNÍ ČIDLA. PŘEVZATO Z [66].....</b>	<b>113</b>
<b>OBR. 82: ROZMĚRY MOSTU VIHANTASALMI. PŘEVZATO Z [82]. ....</b>	<b>113</b>
<b>OBR. 83: PANORAMATICKÝ POHLED NA MOST VIHANTASALMI. ZDROJ AUTOR.....</b>	<b>114</b>
<b>OBR. 84: POHLED NA MOST.....</b>	<b>114</b>
<b>OBR. 85: POHLED NA MOST.....</b>	<b>115</b>
<b>OBR. 86: ZNÁZORNĚNÍ UMÍSTĚNÍ TEPLTNĚ VLHKOSTNÍHO ČIDLA VE VAZNÍKU MOSTU. PŘEVZATO Z [82]. ....</b>	<b>116</b>

<b>OBR. 87: POHLED NA LEPENÉ LAMELOVÉ NOSNÍKY MOSTU.....</b>	<b>116</b>
<b>OBR. 88: KLIMATICKÁ DATA.....</b>	<b>118</b>
<b>OBR. 89: VÝPOČTOVÝ MODEL.....</b>	<b>119</b>
<b>OBR. 90: VÝSLEDKY V LETNÍM MĚSÍCI. ....</b>	<b>120</b>
<b>OBR. 91: VÝSLEDKY V ZIMNÍM MĚSÍCI. ....</b>	<b>121</b>
<b>OBR. 92: SKLON ZKUŠEBNÍCH TĚLES. ZDROJ AUTOR.....</b>	<b>123</b>
<b>OBR. 93: KOTVÍCÍ HŘEBY OPATŘENÉ NÁTĚREM PRO TEPELNĚ IZOLAČNÍ ČIDLA.....</b>	<b>123</b>
<b>OBR. 94: TEPLTNĚ VLHKOSTNÍ ČIDLA.....</b>	<b>124</b>
<b>OBR. 95: POHLED NA VZORKY. ....</b>	<b>124</b>
<b>OBR. 96: UŽITNÝ VZOR. ....</b>	<b>125</b>
<b>OBR. 99: PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY Z TOHO IMPAKTOVANÉ ČLÁNKY 2X Q1 A 1X Q2. ....</b>	<b>145</b>

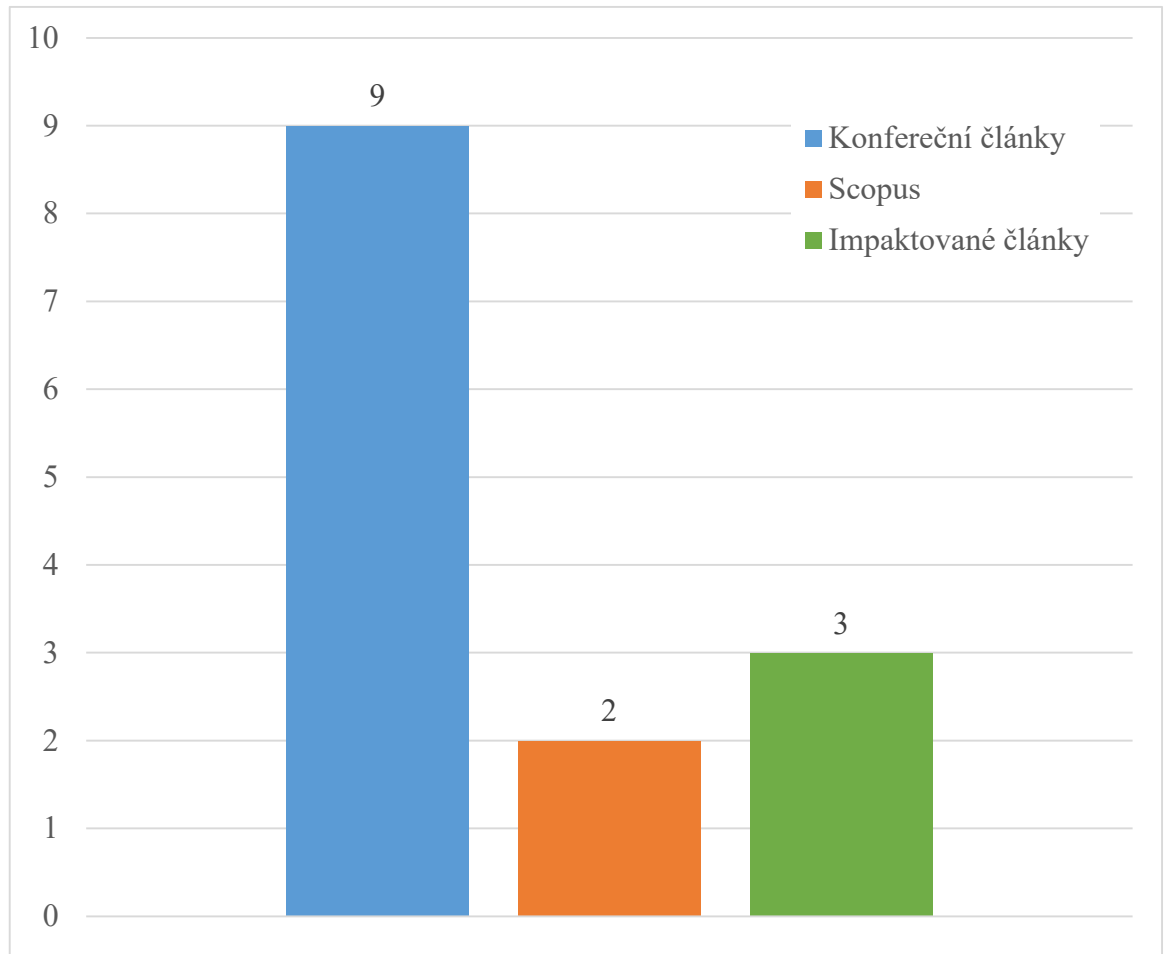
## L SEZNAM TABULEK

<b>TAB. 1: STEJNÁ VLHKOST <math>W_{AIR} = 70 \%</math> PRO ROZDÍLNÉ TEPLoty. ....</b>	<b>25</b>
<b>TAB. 2: STEJNÁ TEPLota <math>T = 0 \text{ }^\circ\text{C}</math> A RůZNÉ VLHKOSTI <math>W_{AIR}</math>.....</b>	<b>26</b>
<b>TAB. 3: HAILWOOD – HARROBINOVA IZOTERMA, PARAMETRY TVARU KŘIVKY [45]. ....</b>	<b>28</b>
<b>TAB. 4: ZMĚNY VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ U DŘEVA VLIVEM VLHKOSTI. PŘEVZATO Z [68].....</b>	<b>31</b>
<b>TAB. 5: DIFÚZNÍ MODEL JÖNSSON – SJÖDIN.....</b>	<b>47</b>
<b>TAB. 6: DIFÚZNÍ MODEL TORATTI. ....</b>	<b>48</b>
<b>TAB. 7: DIFÚZNÍ MODEL NILSSON &amp; SANDBERG.....</b>	<b>50</b>
<b>TAB. 8: MOR VYBRANÝCH DŘEV V OHYBU PŘI VLHKOSTI 12 % A NAD MEZÍ HYGROSKOPICITY (PODLE UGOLEVA 1975 A 1986) [96] A [100]. ....</b>	<b>55</b>
<b>TAB. 9: HODNOTY MEZE PEVNOSTI V TLAKU VE SMĚRU VLÁKEN PRO DŘEVO VYBRANÝCH DŘEVIN PŘI VLHKOSTI 12 % A NAD MEZÍ HYGROSKOPICITY (PODLE UGOLEVA 1975) [96] A [100].....</b>	<b>55</b>
<b>TAB. 10: ZKUŠEBNÍ SÉRIE. ....</b>	<b>63</b>
<b>TAB. 11: MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI POUŽÍVANÉ PŘI ANALÝZE. PŘEVZATO A PŘELOŽENO Z [80].....</b>	<b>81</b>
<b>TAB. 12: VÝSLEDNÉ HODNOTY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK.....</b>	<b>96</b>
<b>TAB. 13: VLHKOSTI VZORKŮ PO ZVLHČOVÁNÍ.....</b>	<b>105</b>
<b>TAB. 14: ROZDĚLENÍ VZORKŮ DO SKUPIN. ....</b>	<b>105</b>

## M SEZNAM PUBLIKOVANÝCH ČLÁNKŮ

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