

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 485

ISSN 1213-418X

Jan Pěňčík

**DŘEVĚNÉ
SEGMENTOVÉ SCHODIŠTĚ
S JEDNOSTRANNĚ
ZAVĚŠENÝMI STUPNI**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav pozemního stavitelství

Ing. Jan Pěňčík, Ph.D

**DŘEVĚNNÉ SEGMENTOVÉ SCHODIŠTĚ
S JEDNOSTRANNĚ ZAVĚŠENÝMI STUPNI**

WOODEN PREFABRICATED STAIRCASE
WITH ONE-SIDED SUSPENDED STAIRS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
OBOR: POZEMNÍ STAVBY



BRNO 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

dřevo, borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), materiálové konstanty, elastické konstanty, materiálový model, schodiště, jednostranně zavěšený stupeň, experiment, MKP.

KEYWORDS

wood, Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), material constants, elastic constants, staircase, material model, one-sided suspended stairstep, experiment, FEM.

HABILITAČNÍ PRÁCE JE ULOŽENA:

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD.....	6
2 DŘEVO	7
2.1 Borovice lesní.....	7
3 MODELOVÁNÍ DŘEVA	8
3.1 Deformační diagram dřeva	9
3.2 Přístupy modelování dřeva a jeho materiálového chování.....	9
3.2.1 <i>Ortotropní materiálový model</i>	11
3.2.2 <i>Anizotropně plastický materiálový model</i>	12
3.2.3 <i>Kritéria porušení</i>	13
3.3 Elastické a materiálové konstanty	14
3.3.1 <i>Elastické a materiálové konstanty borovice lesní</i>	14
4 OVĚŘENÍ ELASTICKÝCH A MATERIÁLOVÝCH KONSTANT.....	15
4.1 Experimentální zkoušky zkušebních těles.....	15
4.2 Numerické modelování experimentálních testů	16
4.2.1 <i>Spolehlivostní analýza</i>	16
4.2.2 <i>Deterministická analýza</i>	18
5 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO SCHODIŠTĚ.....	20
5.1 Identifikace míst se zvýšeným namáháním.....	21
6 ANALÝZA MÍST SE ZVÝŠENÝM NAMÁHÁNÍM.....	22
6.1 Experimentální analýza	22
6.1.1 <i>Zkouška ZK1</i>	22
6.1.2 <i>Zkouška ZK2</i>	23
6.1.3 <i>Zkouška ZK3</i>	23
6.1.4 <i>Zkouška ZK4</i>	23
6.1.5 <i>Vyhodnocení zkoušek ZK1, ZK2, ZK3 a ZK4</i>	24
6.2 Numerická analýza	24
7 MODIFIKACE	26
7.1 Numerické ověření úpravy detailu	27
7.2 Numerické ověření schodiště s navrženými úpravami.....	29
8 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY UPRAVENÉHO SCHODIŠTĚ	30
8.1 Přípravné práce a měřicí zařízení	31
8.2 Statická zatěžovací zkouška	31
8.2.1 <i>Schodiště A</i>	31
8.2.2 <i>Schodiště B</i>	32
8.2.3 <i>Vyhodnocení</i>	33
8.3 Dynamická rázová zkouška madla	34
8.3.1 <i>Schodiště A</i>	34
8.3.2 <i>Vyhodnocení</i>	34
9 ZÁVĚR.....	34
10 LITERATURA	38
ABSTRACT	41

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení:

Jan Pěncík

Datum a místo narození:

23. květen 1973, Brno

Bydliště:

Hlinky 972/34, 603 00 Brno



Adresa do zaměstnání:

VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství

Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Tel: 541 147 433

Fax: 541 240 996

E-mail: pencik.j@fce.vutbr.cz

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

2004		VUT v Brně, Centrum vzdělávání a poradenství, Doplnující pedagogické studium
2001	Ph.D.	VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Teorie konstrukcí
1996	Ing.	VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby
1988	maturita	Gymnázium Vídeňská, Brno, specializovaný obor stavebnictví

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

od 2014		VUT v Brně, Fakulta stavební, člen pedagogické oborové rady pro obor Pozemní stavby
od 2010		VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, odborný asistent
2000 – 2010		VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, asistent (do roku 2001) / odborný asistent (od roku 2001)
1999 – 2000		VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, asistent

Další odborná praxe:

2005	znalec	jmenován Ministrem spravedlnosti České republiky pro obor stavebnictví, odvětví stavby obytné, stavby průmyslové, stavební odvětví různá, se specializací statika, vady a poruchy pozemních a inženýrských staveb
------	--------	---

Odborné a výzkumné zaměření:

IGA VUT v Brně		
FAST-S-14-2418		Konstrukční detaily pasivních domů – tepelná izolace z druhotných surovin LCA-TICM, větrané a vegetační opláštění budov – spoluřešitel
FAST-S-13-2085		Rozvoj metody matematického modelování pro tepelně technické analýzy detailů využívající kompozity z recyklovaných polymerů s predikcí jejich dlouhodobého mechanického chování – řešitel
FAST-S-12-20/1650		Rozvoj viskoelastických materiálových modelů využitelných pro recyklované polymery a kompozity z recyklovaných polymerů – řešitel

FAST-S-11-40/1279 Zdokonalení fyzikálních vlastností Izolačního bloku z druhotných surovin a jejich ověřování metodou MAP v konstrukčních detailech – spoluřešitel

VG FAST, VUT v Brně

VG222 Aplikace metodiky MAP (monitoring, analýza, predikce) na izolačním bloku z odpadního HDPE a jeho kompozitů v patě zdiva v průběhu jeho exploatace – spoluřešitel

VG197 Systém pro dlouhodobý monitoring deformačních vlastností materiálů z recyklovaných polymerů při působení konstantního tlaku – řešitel

GAČR

GAČR 103/08/1278 Aspekty životního prostředí a udržitelného rozvoje v mostním a silničním stavitelství – řešitel

GAČR 103/02/P083 Vývoj konečných prvků pro analýzu konstrukcí z kompozitních materiálů na bázi cementu – řešitel

Spolupráce na projektech, výzkumných záměrech a výzkumných úkolech:

GAČR 103/09/2071, VVZ MSM 0021630511, VVZ MSM 0021630501, VVZ MSM 2161100007, MPO ČR FB-CV/69/98, MPO ČR FI-IM/227, CEP ED3.2.00/08.0146

Publikační a tvůrčí činnost:

- 22 článků v zahraničních časopisech, 23 článků v domácích časopisech, 16 článků na zahraničních vědeckých konferencích, 50 článků na domácích vědeckých konferencích, 83 článků ve sborníku zahraniční a domácí odborné konference, 4 evropské patenty, 10 národních patentů v ČR, 12 užitných vzorů v ČR a v zahraničí, 2 průmyslové vzory, 17 znaleckých posudků, 1 učebnice (spoluautor), 3 vysokoškolská skripta (2× autor a 1× spoluautor)
- v roce 2010 2. místo v technologické kategorii v soutěži TOP 10 Excellence VUT v Brně

Pedagogická činnost:

Bakalářské a magisterské studium

- přednášky: BH02 – Nauka o pozemních stavbách (na ústavu PST), 0D1 – Stavební mechanika I, 0D3 – Statika stavebních konstrukcí 1 a 0D4 – Statika stavebních konstrukcí 2 (0D4) (dříve na ústavu STM)
- člen komise pro obhajobu bakalářských prací – 4 roky na ústavech PST a ARC
- člen komise pro obhajobu diplomových prací – 4 roky na ústavech PST, ARC, TZB a TŘS
- vedení obhájených bakalářských prací – 26× na ústavech PST, STM a ARC
- vedení obhájených diplomových prací – 8× na ústavech PST a STM

Doktorské studium

- člen komise pro státní doktorskou zkoušku – 1×
- člen komise pro obhajobu disertační práce – 1×
- školitel 3 doktorandů v období 2010 – 2014; dva doktorandi jsou po úspěšném absolvování státní doktorské zkoušky a před dokončením práce, třetí před státní doktorskou zkouškou

1 ÚVOD

Schodiště lze definovat jako stupňovitou stavební konstrukci, která slouží k trvalému překonávání výškového rozdílu chůzí [27]. V rámci objektu slouží ke komunikačnímu propojení podlaží objektu nebo k překonání různých výškových úrovní v rámci jednotlivých podlaží. Návrh schodišť se provádí v souladu s normou ČSN 73 4130 Schodiště a šikmé rampy [10].

Při návrhu schodišť je nutné se zabývat statickými, architektonickými, požárně bezpečnostními požadavky, a také požadavky na pohodu prostředí a užívání. Současně je vhodné při návrhu uvažovat i ekonomické požadavky.

Schodiště ve většině případů tvoří dominantní konstrukci celého objektu a dotváří jeho ráz [44]. Při návrhu schodiště je nutné v souladu s ČSN 73 4130 [10] dle typu objektu a i s ohledem na ekonomické faktory správně navrhnout rozměry schodišťového prostoru, konstrukční systém schodiště, rozměry stupňů, tvar stupňů atd. Navržené schodiště by mělo být pro uživatele pohodlné a mělo by zajišťovat proporционаlnost, pravidelnost, rytmus a řád jak je uvedeno v [44].

Volba konstrukčního systému schodišť je ovlivněna architektonickými požadavky architektů a projektantů, ale také i uživatelů, kteří schodiště mohou chápat jako dominantní architektonický prvek, který dopomáhá vytvářet vizuální styl a pohodu moderního objektu. Vhodná volba konstrukčního systému schodiště resp. typu schodiště přispívá k eleganci, originalitě a osobitému stylu objektu. Proto se v současné době navrhuje subtilní, maximálně odlehčená a vzdušná schodiště s atraktivním a moderním designem.

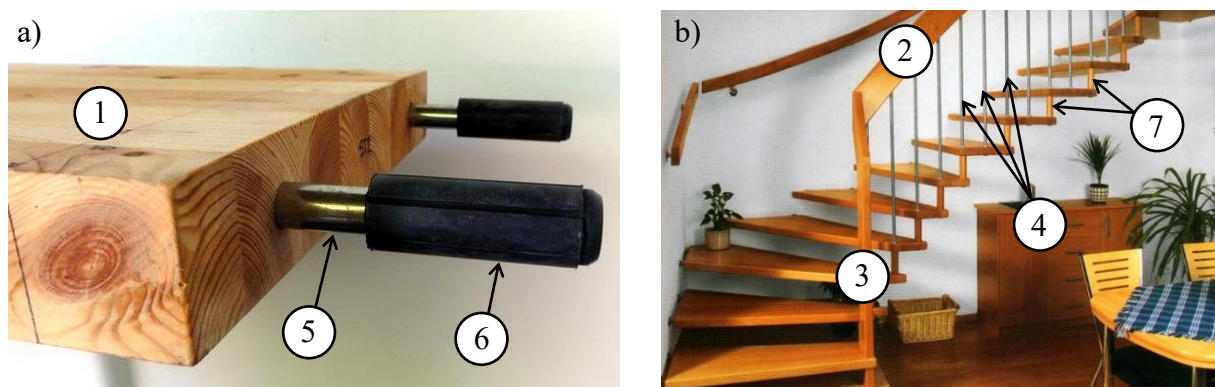
Příkladem schodišť, která splňují uvedené vlastnosti, jsou **dřevěná segmentová schodiště – přímá schodnicová schodiště, točitá schodnicová schodiště, vřetenová schodiště, schodiště s jednostranně zavěšenými stupni**. Jedná se o schodiště převážně určená pro použití při výstavbě rodinných domů. Schodiště jsou vyráběná po částech, tj. segmentech, které jsou následně v objektu vzájemně při jejich instalaci spojovány. Při výrobě těchto schodišť se v převážné míře používá dřevo z lesního porostu České republiky, tj. smrk ztepilý (*Picea abies* L.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), dub zimní (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.), javor mléč (*Acer platanoides* L.) a ořešák královský (*Juglans regia* L.). S ohledem na větší tvarovou stálost a eliminaci kroucení se dřevěné prvky schodišť vyrábí z jednovrstvých desek z rostlého dřeva tzv. spárovek.



Obr. 1: Dřevěné segmentové schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi. Fotografie převzaty z [22].

Na (Obr. 1) jsou zobrazeny dva příklady **dřevěného segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi**. V rámci habilitační práce byla řešena

problematika tohoto typu segmentového schodiště v materiálové variantě z borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Schodiště je podle (Obr. 2) tvořeno dřevěnými stupni (1), madlem (2), sloupky u nástupního a výstupního stupně (3), popř. vnitřními ocelovými nebo nerezovými sloupky, soustavou ocelových táhel (4), prvky pro uložení stupňů do nosné zdi (5) a (6) a dřevěnými nebo nerezovými distančními válečky (7), které vymezují výškovou polohu stupňů.



Obr. 2: Detaily dřevěného segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni. Detail na straně nosné zdi (a) a na vnější straně (b); 1 – stupeň, 2 – madlo, 3 – sloupek u nástupního stupně, 4 – ocelové táhlo, 5 – ocelový trn, 6 – pryžové pouzdro, 7 – distanční váleček. Fotografie (b) převzata z [22].

Při zpracování tématu habilitační práce byly rozvíjeny teoretické aspekty analýzy dřevěných prvků a konstrukcí pomocí metody konečných prvků za použití různých přístupů geometrického modelování a materiálových modelů dřeva včetně uvažování případného porušení materiálu indikovaného kritérii porušení.

Získané poznatky byly po jejich experimentální a numerické verifikaci použity při konstrukční úpravě segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni s cílem zvýšení univerzálnosti a použitelnosti tohoto typu schodišť a zlepšení variability konstrukčního systému se současným snížením nákladů úsporou materiálu na výrobu.

V rámci procesu úpravy segmentového schodiště byl použit přístup Analýza – Popis – Modifikace – Verifikace (APMV), ve kterém je kombinována metoda numerického modelování a experimentálního zkoušení. Pomocí numerického modelování byly zjištěny detaily schodiště se zvýšeným namáháním, které byly posléze experimentálně a numericky analyzovány a na základě zjištěných výsledků modifikovány. Verifikace a ověření navržených úprav a modifikací byla experimentálně provedena na dvou prototypech schodišť v měřítku 1:1. Úpravy byly po provedení a vyhodnocení experimentálních zkoušek začleněny do výrobního programu a jsou ověřeny praxí.

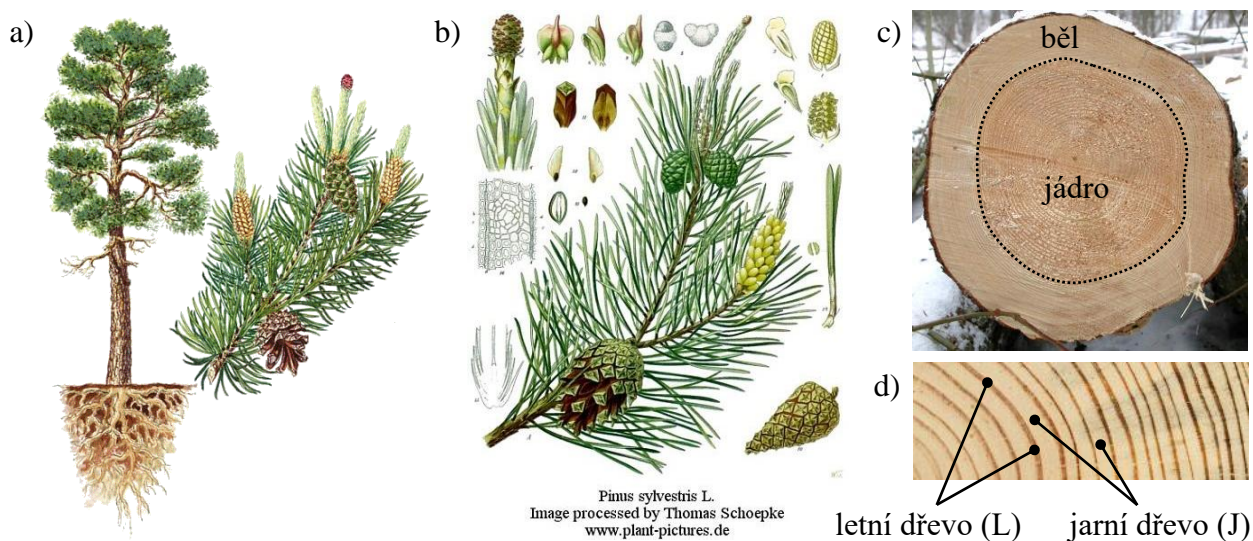
2 DŘEVO

Dřevo je pravděpodobně jedním z nejstarších stavebních materiálů [15], [35] a rozšíření jeho použití je blízce spojeno se snadnou širokou dostupností a zpracovatelností. Jedná se o čistý přírodní materiál, který je tvořený celulózu, ligninem, hemicelulózu a doprovodnými složkami (extraktivní látky) [25] a [42]. Celulóza, která je základní stavební složkou buněčných stěn dřeva má makromolekuly o délce do 0,01 mm, které jsou orientovány převážně v podélném směru buňky dřeva, tedy ve směru osy stromu [42].

2.1 BOROVICE LESNÍ

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (Obr. 3) je podle [39] světově nejrozšířenějším jehličnanem, má mohutný kulovitý hlavní kořen, který zasahuje do velké hloubky. Kmen je převážně přímý s malým větvením. Koruna má většinou kopulovitý až deštníkový tvar, popř. pravidelný

kuželovitý tvar, který ve stáří může být nesymetrický [4]. Strom dorůstá v příznivých klimatických podmínkách výšky 40 m až 45 m s průměrem kmene do 1 m [4].

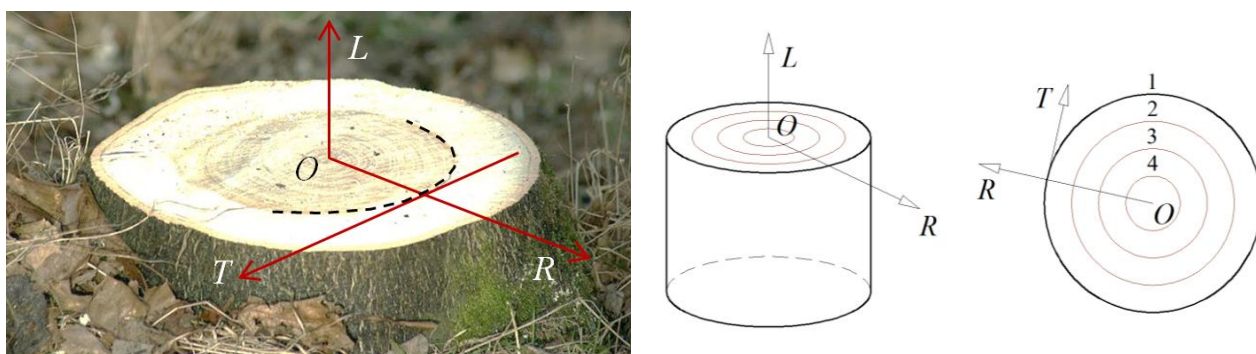


Obr. 3: Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Převzato z [41] (a), [23] (b) a [26] (c) a (d).

Dřevo borovice lesní je podle [26] měkké, křehké a lehké. Objemová hmotnost borového dřeva se podle [42] při 12% vlhkosti pohybuje v intervalu 500 kg/m^3 až 510 kg/m^3 . Mezi výhody tohoto typu dřeva patří snadné ruční i strojní opracování a dělení, avšak na úkor možného silného zanášení nástrojů a brusiva pryskyřicí. Vzhledem k vyššímu množství obsahu pryskyřice je dřevo borovice lesní obtížněji spojitelné lepením. Dřevo má nízkou tuhost a rázovou houževnatost, malou pevnost v ohybu a tlaku a nemá dobré předpoklady pro ohýbání.

3 MODELOVÁNÍ DŘEVA

Vlivem nestejněměrné komplexní struktury a nehomogenity dřeva, různých mechanických vlastností jarního a letního dřeva letokruhů [32], malé deformace dřeňových paprsků v příčném směru a umístěním ztenčenin převážně na radiálních stěnách [42] lze dřevo považovat za výrazně *anizotropní materiál*. Popis dřeva jako materiálu s anizotropními vlastnostmi je uveden v pracích [12], [28], [29] a dalších. U dřeva (pozn. uvažováno na úrovni kmene) se však nevyskytuje obecný stav anizotropie, u kterého neexistují roviny symetrie materiálu a materiálové a pevnostní vlastnosti jsou v libovolných směrech odlišné.



Obr. 4: Definice materiálových směrů L , T , a R a soustavy souřadnic LTR .

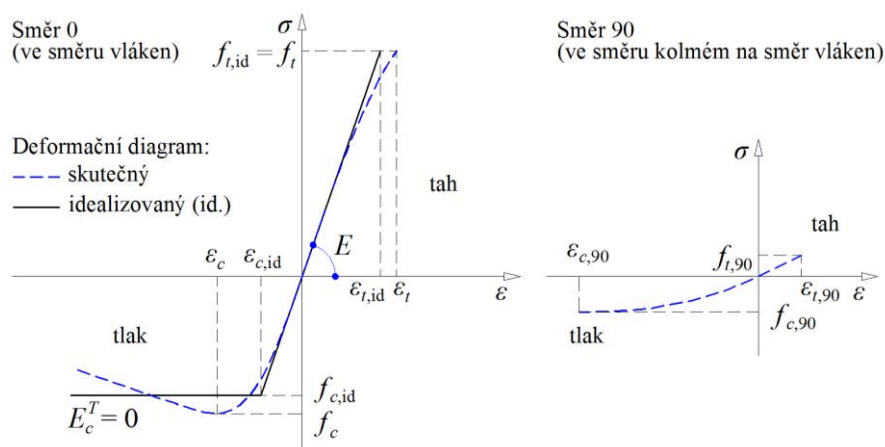
V případě dřeva, existují tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálu [29]. V těchto rovinách má podle [1] dřevo specifické a nezávislé materiálové a pevnostní vlastnosti. Z tohoto důvodu lze dřevo označit za materiál *ortogonálně anizotropní* resp. *ortotropní*. Roviny symetrie – LT , LR a TR

[1], [3], [29], [32] zobrazené na (Obr. 8) lze definovat pomocí podélného (L), tangenciálního (T) a radiálního (R) směru, které jsou zobrazeny na (Obr. 4) společně s válcovou (cylindrickou) soustavou souřadnic LTR s počátkem O ve středu kmene. Plochy LR a TR jsou rovinné. Plocha LT není rovinná, jedná se idealizovaně o válcovou plochu. Při uvažování této idealizace lze reálný kmen, obecně kuželovitého tvaru idealizovat podle [2] válcovým tělesem. Dřevo je potom možné uvažovat jako materiál *válcově ortogonálně anizotropní* resp. *válcově ortotropní* [28] a [29].

Při uvažování dřeva na úrovni řeziva lze válcovou soustavou souřadnic idealizovat kartézskou soustavou souřadnic a dřevo lze uvažovat jako materiál *ortogonálně anizotropní* resp. *ortotropní*. Při této idealizaci dochází k linearizaci obecně zakřivených letokruhů. Chyba idealizace je úměrná vzdálenosti letokruhů od středu kmene. Čím jsou letokruhy dále od středu kmene, tím je chyba idealizace menší.

3.1 DEFORMAČNÍ DIAGRAM DŘEVA

Deformační diagram dřeva, tj. závislost napětí na deformaci ($\sigma - \varepsilon$), je pro případ zatěžování ve směru vláken (směr 0) a ve směru kolmém na vlákna (směr 90) zobrazen na (Obr. 5). Z deformačního diagramu je patrné, že dřevo má vyšší pevnost při namáhání ve směru rovnoběžném s vlákny než ve směru kolmém na vlákna.



Obr. 5: Skutečný a idealizovaný deformační diagram ($\sigma - \varepsilon$) dřeva s využitím [24].

Z (Obr. 5) vyplývá, že ve směru namáhání rovnoběžném s vlákny (směr 0) je pevnost v tahu vyšší než pevnost v tlaku. V tahu je závislost podle [24] mezi napětím a deformací téměř lineární až do porušení, které je náhlé bez předchozího plastického chování. Při porušení dochází k porušení křehkým lomem. V tlaku je závislost mezi napětím a deformací téměř lineární až do meze úměrnosti. Po jejím dosažení je zřejmé plastické chování se značnou plastickou rezervou. Ve směru namáhání kolmém na vlákna (směr 90) je pevnost v tahu nižší než pevnost v tlaku (Obr. 5).

Při analýzách pomocí metody konečných prvků lze skutečný deformační diagram, který je v případě jednoosého stavu napjatosti a směru namáhání rovnoběžném s vlákny znázorněn na (Obr. 5) čárkovanou čarou, idealizovat pružnoplastickým materiálovým modelem bez zpevnění v tlaku a izotropním materiálovým modelem v tahu, který je doplněn o porušení křehkým lomem. Idealizovaný deformační diagram je zobrazen na (Obr. 5) plnou čarou.

3.2 PŘÍSTUPY MODELOVÁNÍ DŘEVA A JEHO MATERIÁLOVÉHO CHOVÁNÍ

Při modelování dřeva pomocí metody konečných prvků [48] lze v závislosti na typu prováděné analýzy použít pro modelování dřeva resp. dřevěných prvků několik možných přístupů a materiálových modelů, které jsou uvedeny v (Tab. 1). Přístupy jsou založeny na předpokladech a



zjednodušeních reálného přírodního materiálu. Při modelování se kromě již dříve uvedených předpokladů a zjednodušení zanedbávají často také lokální poruchy, tj. suky, smolníky a variabilní struktura materiálu. V případě modelování letokruhů lze pro zjednodušení uvažovat jejich neměnný tvar, tloušťku a křivost po délce kmene, i když mají spirálovitý průběh.

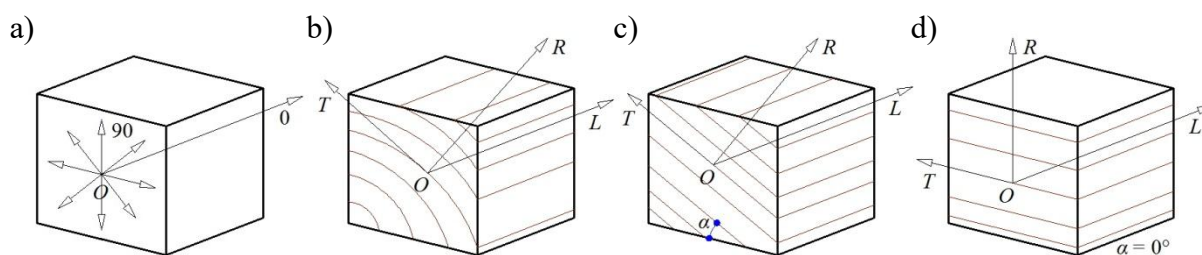
Tab. 1: Přístupy modelování dřeva.

Přístup	Průřez	Materiálový model
P1	Homogenní	Izotropní
P2	Homogenní	Příčně izotropní
P3	Homogenní	Válcově ortotropní
P4	Homogenní	Pravoúhle ortotropní
P5	Nehomogenní	Válcově ortotropní
P6	Nehomogenní	Pravoúhle ortotropní
P7	Homogenní	Válcová anizotropní plasticita
P8	Homogenní	Pravoúhlá anizotropní plasticita
P9	Nehomogenní	Válcová anizotropní plasticita
P10	Nehomogenní	Pravoúhlá anizotropní plasticita

Při modelování dřeva je možné uvažovat rozdíl mezi jarním a letním dřevem, tedy dřevo uvažovat jako nehomogenní materiál, ozn. NH materiál na (Obr. 6) [20], [34], nebo lze rozdíl mezi jarním a letním dřevem zanedbat a dřevo uvažovat jako homogenní materiál, ozn. H materiál na (Obr. 6).



Obr. 6: Skutečný průběh letokruhů s jejich detailem. Příklad idealizace letokruhů válcovými plochami v případě nehomogenního materiálu s uvažováním a modelováním jarního (J, ) a letního dřeva (L, ) a homogenního materiálu při zanedbání rozdílu mezi jarním a letním dřevem.



Obr. 7: Přístupy v případě homogenního materiálu: P2 (a), P3, P7 (b) a P4, P8 (c) a (d).

U nejjednoduššího přístupu modelování dřeva P1 v (Tab. 1) se dřevo uvažuje jako homogenní materiál a materiálové chování je popsáno pomocí *izotropního materiálového modelu*. Při použití ČSN EN 338 (73 1711) a EN 1995-1-1 (73 1701) jsou normami definovány dva navzájem kolmé směry, tj. směr 0 a směr 90, zobrazené na (Obr. 7a), ve kterých jsou definovány hodnoty pevností a modulů pružnosti. Dřevo je uvažováno jako homogenní materiál a jeho chování je popsáno

pomocí *příčně izotropního materiálového modelu*, označení P2 v (Tab. 1). Další materiálový model označený P3 v (Tab. 1) popisuje dřevo jako homogenní materiál, u kterého existují tři vzájemně kolmé roviny symetrie. Současně idealizuje reálný kmen obecně kuželovitého tvaru válcovým tělesem resp. idealizuje průběh letokruhů válcovými plochami (Obr. 7b). Dřevo je potom možné popsat pomocí *válcově ortotropního materiálového modelu*. Čím dále jsou letokruhy vzdálené od jádra resp. středu válcového tělesa idealizující reálný kmen, tak je jejich zakřivení menší. Potom lze přístup P3 nahradit přístupem P4 v (Tab. 1), u kterého se předpokládá dřevo jako homogenní materiál a zanedbává se křivost letokruhů (Obr. 7c) a (Obr. 7d). Dřevo je v tomto případě popsáno pomocí *pravoúhle ortotropního materiálového modelu*. Při uvažování materiálového chování dřeva popsaného pomocí válcové (přístup P3) nebo pravoúhlé (přístup P4) ortotropie se předpokládá lineární chování materiálu bez omezení. Pro reálné modelování pomocí těchto materiálových modelů je potřebné materiálové modely doplnit o kritéria, která indikují porušení materiálu.

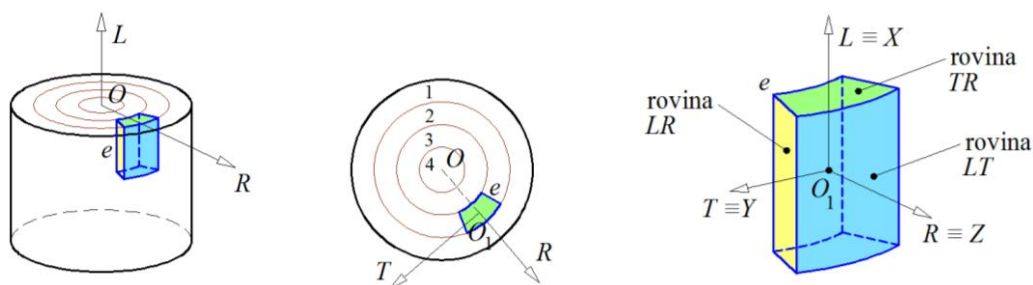
Obecnější přístupy popisují chování dřeva pomocí *obecného anizotropně plastického materiálového modelu*. Tento materiálový model umožňuje definovat rozdílné bilineární pružnoplastické chování s případným zpevněním materiálu ve třech na sebe navzájem kolmých směrech, včetně definování různého chování v těchto směrech v tahu, tlaku a ve smyku. Z důvodu rozdílného chování dřeva v tahu a tlaku je vhodné materiálový model modifikovat tak, aby v tahu docházelo k porušení křehkým lomem. Modifikace modelu v tlaku není nutná, protože dřevo má značnou plastickou rezervu. I v tomto případě materiálového modelu lze uvažovat idealizaci reálného kmene válcovým tělesem resp. idealizaci průběhu letokruhů válcovými plochami (přístup P7 v (Tab. 1)) nebo lze křivost letokruhů zanedbat (přístup P8 v (Tab. 1)). V přístupu P7 je dřevo popsáno pomocí *válcově anizotropně plastického materiálového modelu* a v přístupu P8 pomocí *pravoúhle anizotropně plastického materiálového modelu*.

Přístupy P3, P4, P7 a P8 lze modifikovat uvažováním rozdílu mezi jarním a letním dřevem, jak bylo řešeno v pracích [20] a [34]. Potom je dřevo uvažováno jako nehomogenní materiál, tak jak je uvedeno v (Tab. 1) u přístupů P5, P6 a P9 a P10.

Při numerických analýzách prováděných v rámci habilitační práce pomocí metody konečných prvků byly použity přístupy P3, P4, P7 a P8 (Tab. 1). Dřevo bylo při všech výpočtech uvažováno jako homogenní materiál a k jeho popisu byly použity ortotropní nebo anizotropně plastické materiálové modely s uvažováním nebo zanedbáním zakřivení letokruhů.

3.2.1 Ortotropní materiálový model

Ortotropní materiálový model je definován třemi materiálovými směry L , T a R , které jsou vzájemně kolmé (Obr. 4) a (Obr. 8). Mechanické chování materiálu je v ortotropních směrech různé. Materiálový model je podle [3] a [46] definován devíti elastickými konstantami: modulem pružnosti ve směru materiálové osy L (E_L), T (E_T) a R (E_R), modulem pružnosti ve smyku v rovinách LT (G_{LT}), TR (G_{TR}) a LR (G_{LR}) a Poissonovými součiniteli příčné deformace v rovinách LT (ν_{LT}), TR (ν_{TR}) a LR (ν_{LR}). Zbývající Poissonovy součinitele se určí pomocí vztahů (1).



Obr. 8: Soustava souřadnic na úrovni kmene LTR a obecného elementu e vyjmutého z kmene.

$$\frac{\nu_{TR}}{E_T} = \frac{\nu_{RT}}{E_R}, \quad \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}, \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}, \quad \nu_{LT}\nu_{TR}\nu_{RL} = \nu_{TL}\nu_{RT}\nu_{LR}. \quad (1)$$

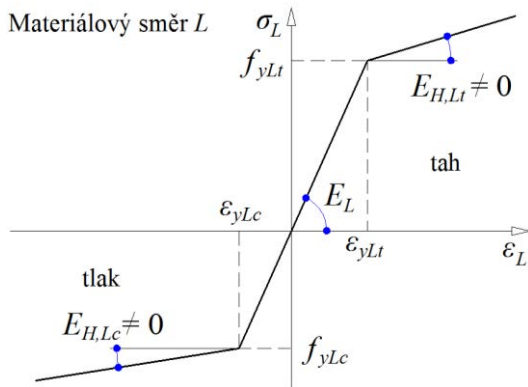
Inverzní tvar Hookova zákona pro ortotropní materiálový model v souřadnicové soustavě LTR je vyjádřen v rozepsaném maticovém zápisu pomocí složek vektoru napětí $\{\sigma\}$ a vektoru deformace $\{\varepsilon\}$ ve tvaru (2).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_{TR} \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{TR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{LT} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

3.2.2 Anizotropně plastický materiálový model

Zobecněný Hookův zákon anizotropního materiálového modelu je vyjádřen v základním tvaru pomocí vektoru napětí $\{\sigma\}$, vektoru deformace $\{\varepsilon\}$ a matice tuhosti materiálu $[C]$ ve tvaru (3).

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (3)$$



Obr. 9: Deformační diagram $(\sigma - \varepsilon)$.

Anizotropně plastický materiálový model obsažený v materiálové knihovně výpočtového software ANSYS (ANISO), který byl použit v rámci habilitační práce při numerických analýzách je založen na Hillově podmínce plasticity pro ortotropní materiály a předpokládá asociativní zákon plastického tečení [32]. Umožňuje definovat rozdílné bilineární pružnoplastické chování s případným zpevněním materiálu ve třech navzájem kolmých směrech (L , T a R) včetně definování různého chování v těchto směrech v tahu, tlaku a ve smyku. Příklad deformačního diagramu pro normálové namáhání ve směru materiálové osy L je zobrazen na (Obr. 9).

Celkem je anizotropně plastický materiálový model definován třemi deformačními diagramy pro normálové namáhání a třemi deformačními diagramy pro smykové namáhání. Deformační diagramy jsou popsány 9 materiálovými a 9 elastickými konstantami, celkem 18 konstantami – tahovou pevností na mezi kluzu f_{yit} a modulem zpevnění v tahu $E_{H,it}$, tlakovou pevností na mezi kluzu f_{yic} a modulem zpevnění v tahu $E_{H,ic}$ pro $i = L, T, R$, smykovou pevností f_{ij} a odpovídajícími moduly zpevnění $E_{H,ij}$ pro $ij = LT, TR$ a LR . Kromě uvedených materiálových a elastických konstant je model popsán dalšími 9 elastickými konstantami podobně jako v případě ortotropního materiálového modelu.

Materiálové konstanty anizotropně plastického materiálového modelu musí podle [32] splňovat podmínku plastické nestlačitelnosti (4) a podmínku (5), kterou je zajištěna uzavřená plocha plasticity eliptického tvaru.

$$\frac{f_{yLt} - f_{yLc}}{f_{yLt}f_{yLc}} + \frac{f_{yTt} - f_{yTc}}{f_{yTt}f_{yTc}} + \frac{f_{yRt} - f_{yRc}}{f_{yRt}f_{yRc}} = 0 \quad (4)$$

$$M_{11}^2 + M_{22}^2 + M_{33}^2 - 2(M_{11}M_{22} + M_{22}M_{33} + M_{11}M_{33}) < 0, \quad M_{ii} = \frac{f_{yLt}f_{yLc}}{f_{yit}f_{yic}} \text{ pro } i = L, T, R \quad (5)$$

3.2.3 Kritéria porušení

K predikci porušení obecně anizotropních materiálů lze použít *neinteraktivní* a *interaktivní kritéria*. Neinteraktivní kritéria porušení nezohledňují vzájemnou vazbu mezi normálovými složkami napětí a ani mezi složkami normálových a smykových napětí. Mezi tato kritéria patří kritérium maximálního napětí a kritérium maximální deformace. Vzájemnou vazbu mezi normálovými složkami napětí a mezi složkami normálových a smykových napětí zohledňují interaktivní kritéria porušení, mezi která patří kritérium Hillovo, Martinovo, Norrisovo, Azzi-Tsai, Hoffmanovo, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Tsai-Hahn a další.

U dřeva, které má obecně různé pevnosti v tahu a tlaku se nejčastěji pro predikci porušení používá interaktivní Hoffmanovo [19] a Tsai-Wu [43] kritérium. Tato kritéria byla použita v rámci řešeného tématu habilitační práce pro predikci porušení dřeva při použití ortotropního materiálového modelu. V případě uvažování anizotropně plastického materiálového modelu bylo pro modelování křehkého lomu v tahu použito kritérium maximálního napětí.

Kritérium maximálního napětí

V případě kritéria maximálního napětí dojde k porušení materiálu, když jedna ze složek normálového nebo smykového napětí přesáhne odpovídající mez pevnosti [45]. V případě prostorového stavu napjatosti lze kritérium zapsat pro soustavu souřadnic *LTR* pomocí pevnostních podmínek ve tvaru (6).

$$f_{ic} < \sigma_i < f_{it} \text{ pro } i = L, T, R, \quad |f_{ij}| < \sigma_{ij} \text{ pro } ij = LT, TR, LR \quad (6)$$

Hoffmanovo a Tsai-Wu kritérium

Popis interaktivního Hoffmanova a Tsai-Wu kritéria porušení lze provést podle [43] pro prostorový stav napjatosti (3D) pomocí zápisu ve tvaru polynomu při popisu plochy porušení jako funkce materiálových pevností resp. materiálových konstant. Obecný vztah pro porušení zapsaný pomocí tenzorů ve tvaru polynomu je uveden s využitím [43] ve tvaru (7), kde členy F_i , F_{ij} a F_{ijk} vyjadřují vliv materiálových pevností. Podle [43] lze člen F_{ijk} zanedbat. Potom lze vztah (7) zapsat ve zkráceném tvaru.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k \geq 1 \rightarrow \text{zkrácený tvar: } F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \geq 1, \text{ pro } i, j, k = 1 \dots 6 \text{ (3D)} \quad (7)$$

$$F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 + \\ + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 \geq 1 \quad (8)$$

V případě ortotropního materiálového modelu lze podle [43] zanedbat členy mimo hlavní diagonálu, tj. členy F_4 , F_5 a F_6 . Podmínku porušení (7) lze zapsat ve výsledném tvaru (8), ve kterém jsou σ_1 až σ_6 uspořádané složky vektoru napětí $\{\sigma\}$. V případě soustavy souřadnic *LTR*

platí $\sigma_1 \equiv \sigma_L$, $\sigma_2 \equiv \sigma_T$, $\sigma_3 \equiv \sigma_R$, $\sigma_4 \equiv \sigma_{TR}$, $\sigma_5 \equiv \sigma_{LR}$, $\sigma_6 \equiv \sigma_{LT}$. Hodnoty členů F_i , F_{ij} jsou uvedeny v [5], [19] a [43].

3.3 ELASTICKÉ A MATERIÁLOVÉ KONSTANTY

Podle [1], [24], [42] a dalších se dřevo jako přírodní materiál vyznačuje značnou variabilitou materiálově mechanických vlastností. Vlastnosti materiálu, tj. *elastické konstanty* (moduly pružnosti) a *materiálové konstanty* (pevnosti), objemová hmotnost a další mají podle [1] a [42] výrazný rozptyl, a to jak po šířce průřezu kmene, tak i po jeho délce. Průměrné hodnoty variačních koeficientů podle Bergmana [1] pro 12% vlhkost dřeva jsou uvedeny v (Tab. 2). Vlastnosti vykazují rozptyl i mezi jednotlivými stromy téže dřeviny. Rozptyl vlastností je způsoben obecnou strukturou dřevní hmoty, která je směrově orientována v závislosti na působícím zatížení a jeho směru, na vlhkosti, teplotě prostředí atp. Rovněž uvnitř jednoho letokruhu nejsou vlastnosti konstantní, protože jarní a letní dřevo vykazuje výrazně rozdílné vlastnosti [6] a [33].

Tab. 2: Průměrné variační koeficienty (*VK*) podle [1].

	<i>VK</i>		<i>VK</i>
Pevnost v ohybu	16 %	Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	18 %
Modul pružnosti ve směru vláken	22 %	Pevnost v tlaku kolmo na vlákna	28 %
Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	25 %	Pevnost ve smyku rovnoběžně s vlákny	14 %

3.3.1 Elastické a materiálové konstanty borovice lesní

V [3], [11], [40] a dalších jsou uvedeny hodnoty elastických konstant pro borovici lesní. Hodnoty konstant se od sebe v některých případech značně liší. Například modul pružnosti ve směru vláken E_L se může podle uvedených zdrojů pohybovat v intervalu od 10200 MPa do 16285 MPa. Podobné rozptyly platí i v případě modulu pružnosti v tangenciálním směru E_T a modulu pružnosti v radiálním směru E_R . Rozdíly existují i v případě modulů pružnosti ve smyku.

Tab. 3: Elastické a materiálové konstanty borovice lesní.

E_L	E_T	E_R	G_{RT}	G_{LT}	G_{LR}	ν_{RT}	ν_{LT}	ν_{LR}	E_b
14300	545	700	500	800	1230	0,38	0,04	0,03	12800
f_{Lt}	f_{Lc}	f_{Tt}	f_{Tc}	f_{Rt}	f_{Rc}	f_{LR}	f_{LT}	f_{RT}	R_b
103	48,5	3,5	7,6	5,4	5,2	7,5	7,3	2,3	86

Poznámka: E , G , R a f jsou uvedeny v [MPa], ν [-]; E_b – modul pružnosti, R_b – pevnost v ohybu; vše pro $w = 12\%$.

Tab. 4: Materiálové konstanty borovice lesní pro anizotropně plastický materiálový model.

f_{Lt}	f_{Lc}	f_{Tt}	f_{Tc}	f_{Rt}	f_{Rc}	f_{LR}	f_{LT}	f_{RT}
101	43	4,92	5,4	5,4	5,2	7,5	7,3	2,3

Poznámka: nebylo uvažováno se zpevněním materiálu – $E_{H,it} = E_{H,ic} = E_{H,ij} = 0$

V literatuře [30] a [42] zaměřené na dřeviny rostoucí v České a Slovenské republice jsou uvedeny elastické a materiálové konstanty borovice lesní. Tyto konstanty doplněné o informace ze zdrojů [38] a [31] a uvedené v (Tab. 3) byly použity při analýzách dřevěných prvků a konstrukcí pomocí metody konečných prvků provedených v rámci habilitační práce v případě popisu chování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu s kritérii porušení. S ohledem na splnění podmínek (4) a (5) byly materiálové konstanty použité při popisu chování dřeva pomocí anizotropně plastického materiálového modelu upraveny a jsou uvedeny v (Tab. 4).

Elastické konstanty uvedené v (Tab. 3) splňují kritéria (9) podle [18] a (10) podle [47] vyjadřující jejich vzájemnou relaci.

$$E_L > E_R > G_{LR} \approx G_{LT} > E_T > G_{RT} \quad (9)$$

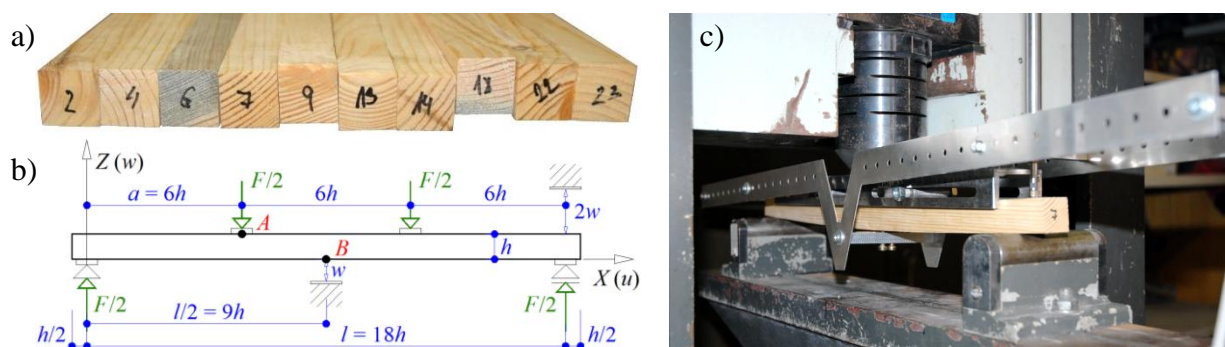
$$E_L \square E_R > E_T, \quad G_{LR} > G_{LT} \square G_{RT}, \quad \nu_{LR} > \nu_{LT} > \nu_{RT} \quad (10)$$

4 OVĚŘENÍ ELASTICKÝCH A MATERIÁLOVÝCH KONSTANT

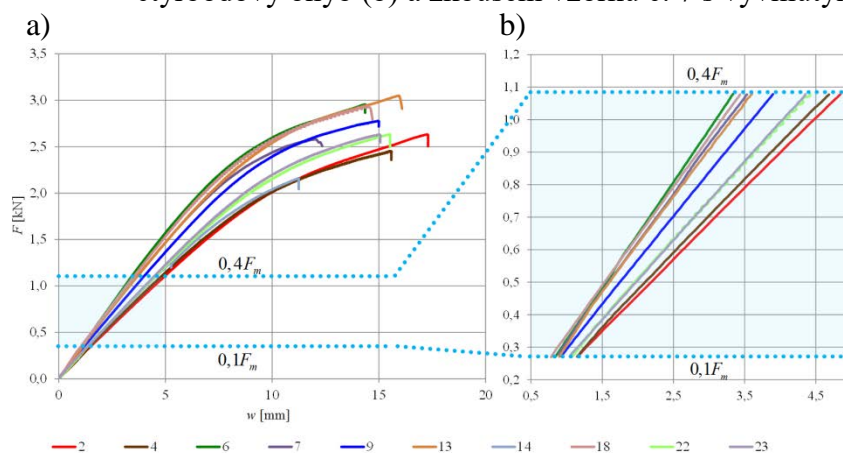
Ověření zvolených elastických a materiálových konstant, které jsou uvedeny v (Tab. 3) a (Tab. 4), bylo provedeno kombinací metody experimentálního zkoušení, statistického vyhodnocení a numerického modelování.

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

V rámci experimentálních zkoušek bylo zkoušeno 10 ks zkušebních těles (Obr. 10a) z borovice lesní o rozměrech $25 \times 25 \times 475$ mm podle ČSN EN 384 a ČSN EN 408. Zkušební tělesa byla prostě podepřena. Vzdálenost podpor o velikosti 18-ti násobku výšky průřezu byla zvolena podle ČSN EN 408, (Obr. 10b). Zatěžování zkušebních těles na čtyřbodový ohyb zobrazené na (Obr. 10b) a (Obr. 10c) bylo provedeno symetricky dvěma břemeny vzájemně od sebe a od podpor vzdálenými o 6-ti násobek výšky průřezu, tj. 150 mm. Zkušební sestava byla doplněna o vyvinutý „V“ přípravek, který zamezil vybočení zkušebních těles při umožnění jejich průhybu v rovině XZ (Obr. 10c). Pomocí zkoušek byla stanovena pevnost v ohybu R_b , modul pružnosti v ohybu E_b a objemová hmotnost ρ .



Obr. 10: Pohled na 10 ks dřevěných zkušebních těles (a), uspořádání zatěžovací zkoušky na čtyřbodový ohyb (b) a zkoušení vzorku č. 7 s vyvinutým „V“ přípravkem (c).



Obr. 11: Pracovní diagram ($F - w$).

Výstup z experimentálních zkoušek ve formě grafu závislosti působícího zatížení F na svislém posunutí w v polovině rozpětí (bodě B) podle (Obr. 10b) je zobrazen pro celý interval zatěžování na (Obr. 11a). Pevnost v ohybu R_b a modul pružnosti v ohybu E_b byl stanoven podle ČSN EN 408 pomocí regresní analýzy využívající část grafu (Obr. 11b), tj. interval $0,1F_m$

až $0,4F_m$, kde F_m je průměrné lomové zatížení stanovené ze zkoušek 10 ks zkušebních těles ($F_m = 2,693$ kN). Zjištěná průměrná hodnota pevnosti v ohybu R_b resp. modulu pružnosti v ohybu E_b měla velikost $R_b = 75,9$ MPa resp. $E_b = 12935,4$ MPa.

Experimentálně zjištěná průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu se od hodnoty modulu pružnosti v ohybu podle literatury viz (Tab. 3) lišila o 1,06 %. V případě pevnosti v ohybu byl zjištěn rozdíl 11,74 %.

S ohledem na zjištěné rozdíly bylo provedeno ověření, zdali konstanty uvedené v literatuře viz (Tab. 3) lze použít i pro materiál zkušebních těles. Ověření bylo provedeno pomocí statistického vyhodnocení experimentálně naměřené hodnoty modulu pružnosti v ohybu a hodnoty modulu pružnosti v ohybu uvedené v literatuře. Při statistickém vyhodnocení bylo provedeno testování, v rámci kterého bylo porovnáváno, zdali je experimentálně stanovený průměr modulu pružnosti v ohybu v rozporu s teoretickou hodnotou uvedenou v literatuře. Testováním, které bylo provedeno pomocí jednovýběrového t -testu s předpokladem normality posouzeným Shapiro-Wilksovým testem, bylo prokázáno, že experimentálně stanovený průměr modulu pružnosti v ohybu není v rozporu s teoretickou hodnotou. Tímto způsobem byla prokázána možnost použití v literatuře uvedeného modulu pružnosti v ohybu resp. dalších elastických a materiálových konstant uvedených v (Tab. 3) pro definici materiálových modelů a kritérií porušení.

4.2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH TESTŮ

Experimentální zkoušky zkušebních těles byly za účelem ověření elastických a materiálových konstant uvedených v (Tab. 3) a (Tab. 4) také numericky modelovány pomocí spolehlivostní a deterministické analýzy.

4.2.1 Spolehlivostní analýza

Spolehlivostní analýza obecně respektuje skutečnost, že zvolené vstupní veličiny popisující geometrii analyzované konstrukce, elastické a materiálové konstanty, působící zatížení jsou obecně zatíženy nejistotami [17].

V případě dřeva se lze setkat se značnou variabilitou materiálově mechanických vlastností (Tab. 2). V rámci spolehlivostní analýzy provedené ve výpočtovém systému ANSYS pomocí parametrického 2D výpočtového modelu dřevěných zkušebních těles využívající symetrických okrajových podmínek byly za náhodné vstupní veličiny uvažovány – modul pružnosti ve směru vláken E_L a pevnost v tahu f_{Lt} a tlaku f_{Lc} ve směru vláken. Možná náhodná proměnlivost vstupních veličin byla stanovena podle [1], viz (Tab. 2). Pro každou veličinu (Tab. 5) byl stanoven interval, ve kterém se s vysokou pravděpodobností budou reálné hodnoty veličin vyskytovat a odpovídající rozdělení pravděpodobnosti. Pro všechny veličiny bylo uvažováno normální rozdělení pravděpodobnosti (RP). Geometrie výpočtového modelu byla uvažována jako neměnná.

Tab. 5: Statistické parametry vstupních veličin (jednotky v [MPa], [–]).

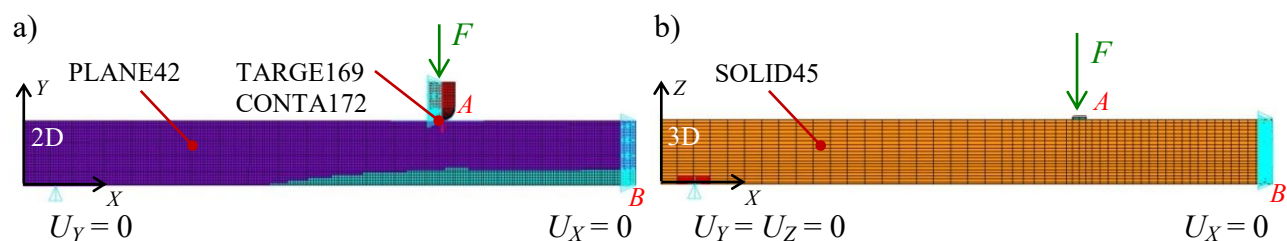
Veličina	NA	SO	VK	Min	Max	SK	RP
E_L	14300	3137,96	22 %	6979,93	21620,1	6,754E-07	normální
f_{Lt}	103	25,66	25 %	43,09	162,92	-0,039938	normální
f_{Lc}	48,5	8,82	18 %	28,12	68,81	-0,060510	normální

Poznámka: NA – střední hodnota, SO – směrodatná odchylka, VK – variační koeficient, SK – šikmost.

Pro potřeby zavedení vlivu nejistot do výpočtu byla použita simulační metoda ULHS – *Updated Latin Hypercube Sampling* [16]. Pomocí statistických parametrů vstupních veličin (Tab. 5) byly vytvořeny dvě sady dat – označené SA a SB. Při generování první sady (SA) byla předpokládána vzájemná statistická nezávislost vstupních veličin. Při generování druhé sady (SB)

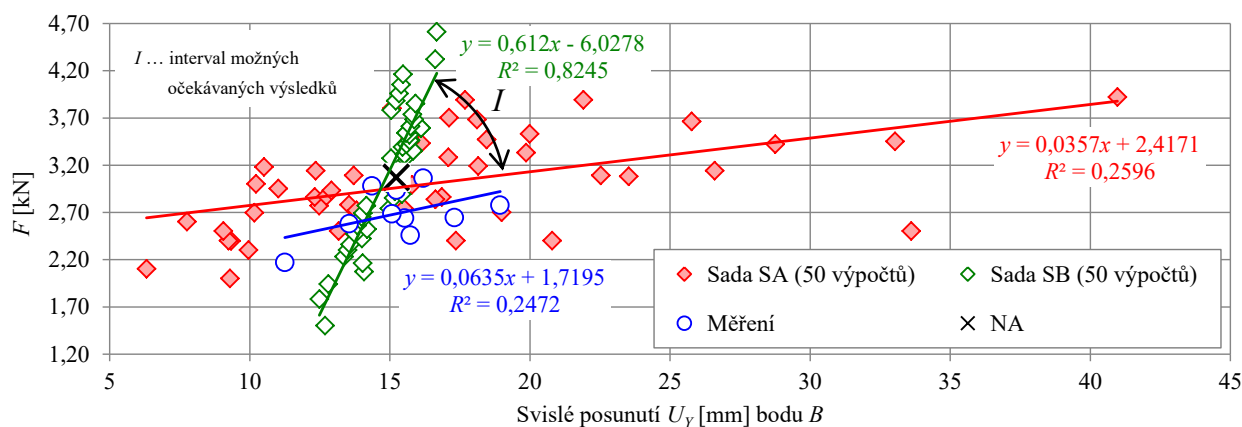
byla předpokládána vzájemná statistická závislost vstupních veličin s koeficientem korelace 1,0. Tímto postupem byly vygenerovány dva krajní případy statistické závislosti vstupních veličin.

Výpočtový model (Obr. 12a) byl vytvořen pomocí 2D konečných prvků typu PLANE42 a kontaktních konečných prvků TARGE169 a CONTA172, kterými bylo přenášeno zatížení z tlačného prvku na zkušební těleso. K modelování chování materiálu dřeva byl použit vytvořený uživatelský materiálový model – *modifikovaný bilineární materiálový model bez zpevnění v tlaku a s křehkým lomem v tahu* modelovaný pomocí kritéria maximálního napětí.



Obr. 12: Výpočtový model použitý při spolehlivostní (a) a deterministické (b) analýze.

Výstup spolehlivostní analýzy pro obě sady dat (SA, SB) je ve formě grafu závislosti síly na mezi únosnosti F působící v bodě A na svislém posunutí U_Y v bodě B zobrazen na (Obr. 13). V grafu jsou vyneseny kromě výsledků spolehlivostní analýzy i výsledky experimentálních testů dřevěných zkušebních těles. Grafické výstupy jsou doplněny o výsledky regresní analýzy ve formě jednoduché lineární spojnice trendu. Rovnice regrese s hodnotami spolehlivosti R^2 a indexem korelace I_{yx} jsou uvedeny na (Obr. 13). Kromě výsledků spolehlivostní analýzy je na (Obr. 13) zobrazen výsledek nominálního výpočtu (označení NA) vycházející z nominálních hodnot rovných středním hodnotám vstupních veličin, který však podle [36] neposkytuje informaci o průměrném chování analyzované konstrukce.



Obr. 13: Graf závislosti síly na mezi únosnosti F na svislém posunutí U_Y .

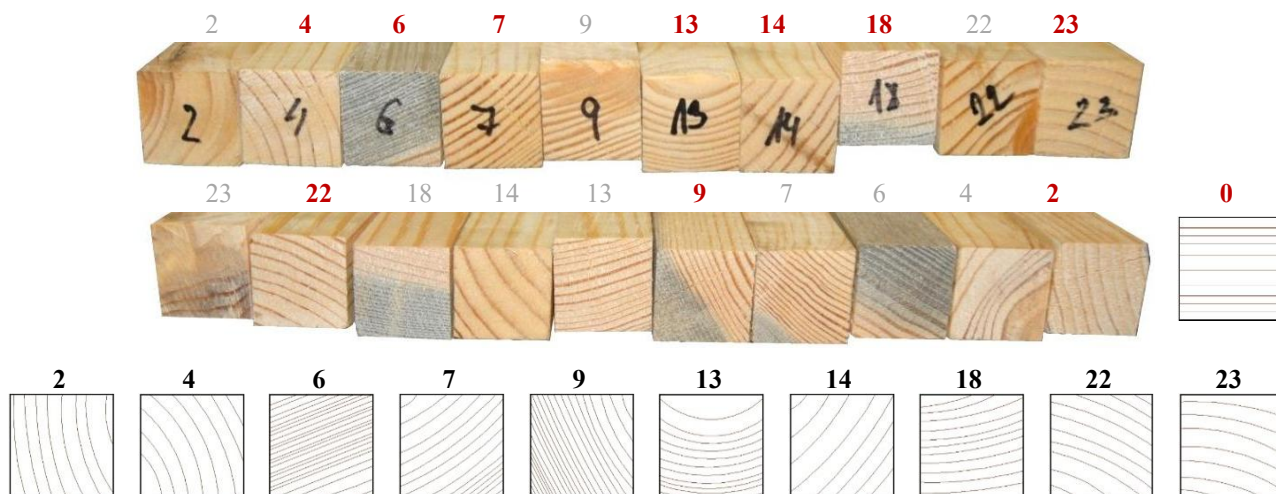
Vygenerováním sady se vzájemnou statistickou nezávislostí vstupních veličin (SA) a sady se vzájemnou statistickou závislostí vstupních veličin (SB) byl určen interval I možných očekávaných výsledků testů zobrazený na (Obr. 13). Z grafického porovnání naměřených dat s výsledky statistické analýzy je zřejmá dobrá shoda. Průběh regresní křivky naměřených dat se více shoduje s průběhem regresní křivky sady SA generovaných bez statistické závislosti vstupních veličin; indexy korelací mají hodnoty 0,5095 (SA) resp. 0,5086 (měření). Větší shody mezi výsledky spolehlivostní analýzy a experimentálních testů by bylo pravděpodobně dosaženo při uvažování horního omezení normálního rozdělení pravděpodobnosti vstupních veličin. Dalším možným důvodem rozdílu byla volba výpočtového modelu a jeho idealizace.

Získané výsledky potvrdily závěr týkající se možnosti použití hodnoty modulu pružnosti ve směru vláken E_L a následné volby elastických a materiálových konstant (Tab. 3).

4.2.2 Deterministická analýza

Pro vzájemné porovnání materiálových modelů a přístupů modelování dřeva P3, P4, P7 a P8 uvedených v (Tab. 1) a pro srovnání kritérií porušení (kritéria maximálního napětí, Hoffmanova a Tsai-Wu kritéria) byla provedena deterministická analýza experimentálních testů zkušebních těles.

Deterministická analýza byla provedena pomocí 10 prostorových 3D výpočtových modelů zkušebních těles vytvořených ve výpočtovém systému ANSYS za použití symetrických okrajových podmínek. Výpočtové modely (Obr. 12b) byly vytvořeny pomocí 3D konečných prvků typu SOLID45. Výpočtové modely pro přístupy P3 resp. P7 se lišily uspořádáním příčných řezů. Příčné řezy, které respektovaly průběh letokruhů, byly vytvořeny pomocí jednoho z čelních pohledů na zkušební tělesa. Při jejich vytváření se předpokládalo, že kmen obecně kuželovitého tvaru lze idealizovat válcovým tělesem, a že letokruhy mají po délce zkušebního tělesa neměnnou křivost. Pohled na čela zkušebních těles a jim odpovídající příčné řezy výpočtových modelů jsou zobrazeny na (Obr. 14). Výpočtové modely zkušebních těles byly doplněny o jeden výpočtový model, který byl použit s přístupem P4 resp. P8. U tohoto výpočtového modelu bylo zakřivení letokruhů zanedbáno a předpokládalo se, že letokruhy jsou rovnoběžné s vodorovnou hranou příčného řezu zkušebního tělesa. Tento příčný řez je na (Obr. 14) označen jako těleso 0.

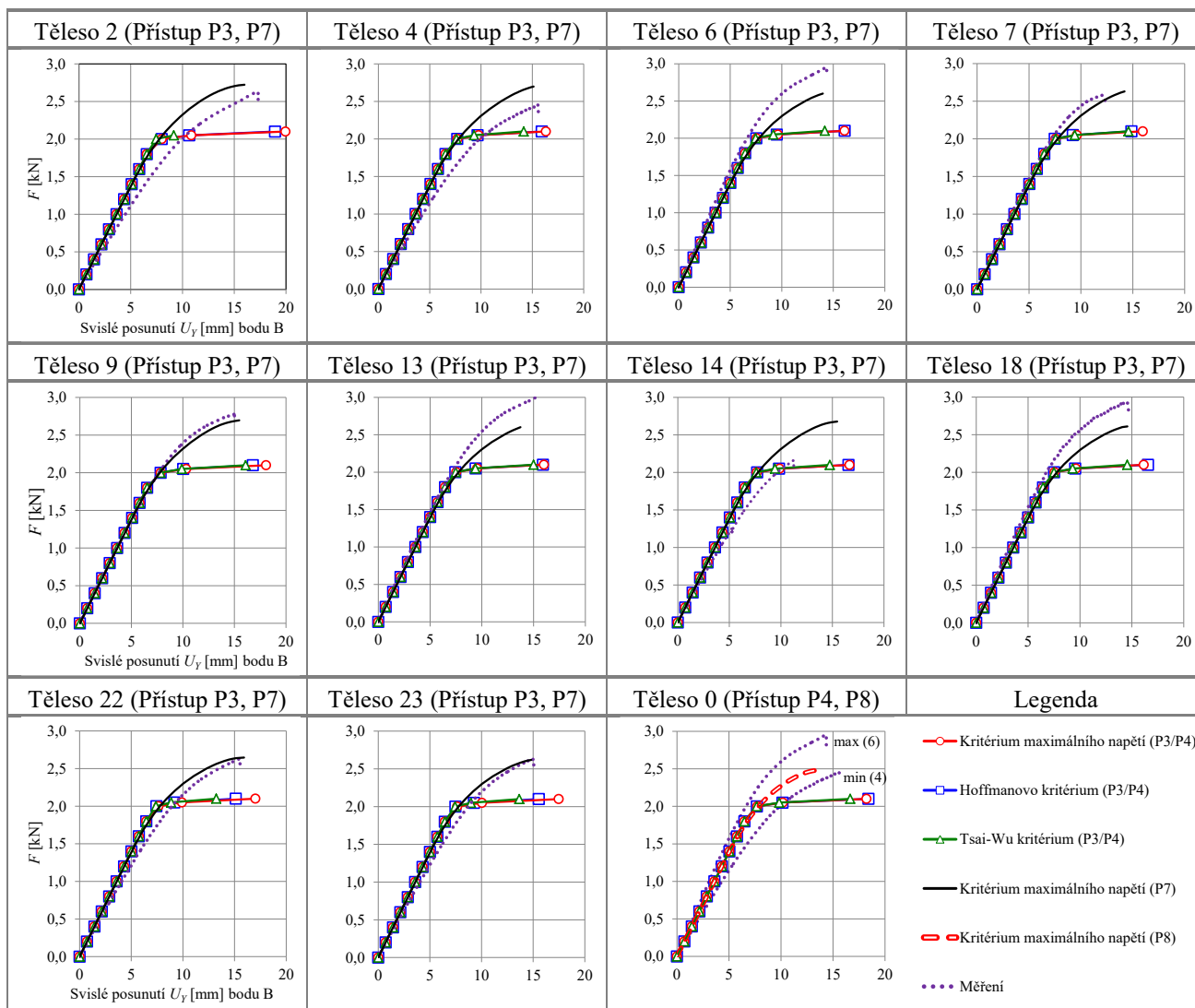


Obr. 14: Pohled na čela zkušebních těles a příčné řezy jejich výpočtových modelů. Pohled použitý pro vytvoření příčného řezu zkušebního tělesa je zvýrazněn.

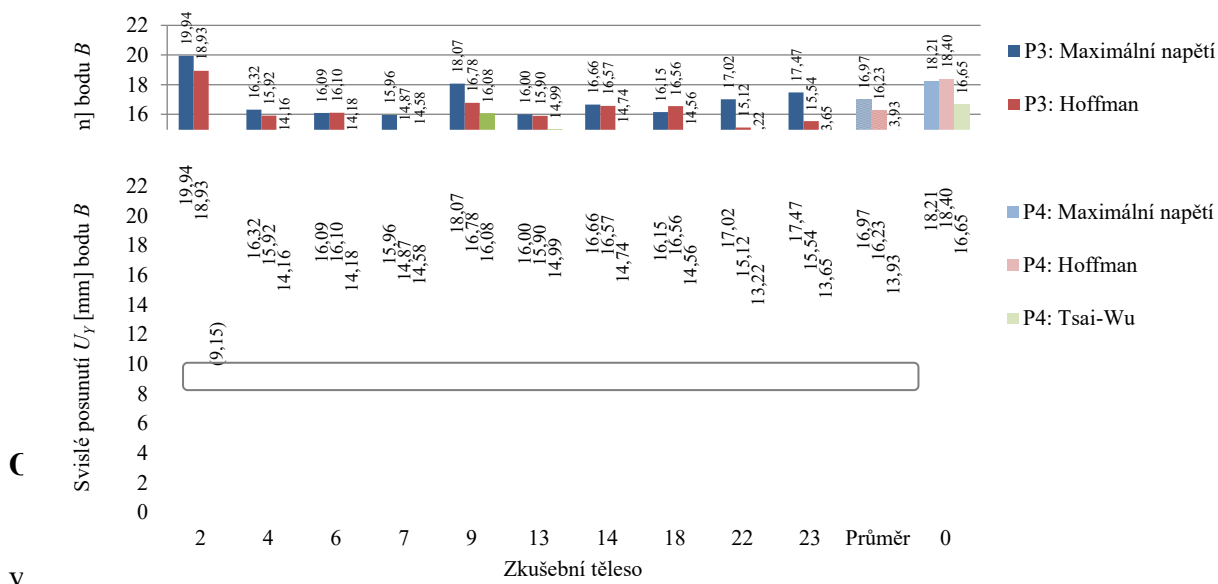
Při výpočtech byl uvažován vliv velkých posunů a rotací konečných prvků, tj. geometrická nelinearita. V případě přístupů P3 a P4, které modelují chování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu, byly výpočty materiálově lineární. Výpočty při použití přístupu P7 a P8 využívající k popisu dřeva anizotropně plastický materiálový model byly materiálově nelineární.

Výstupy měření a numerických analýz ve formě pracovních diagramů popisující závislosti svíslého posunutí U_Y bodu B , který byl zvolen v polovině rozpětí na zatížení F působící v bodě A (Obr. 10b) a (Obr. 12), jsou pro všechna analyzovaná zkušební tělesa zobrazeny na (Obr. 15). Při použití přístupů P3 a P4 (těleso 0), ve kterých bylo chování dřeva modelováno pomocí ortotropního materiálového modelu v kombinaci s kritérii porušení, došlo k indikaci počátečního porušení dřeva při působení zatížení o velikosti 1,8 kN. Výsledky numerického řešení jsou u většiny zkušebních těles v části do indikace prvních poruch ve velmi dobré shodě s experimentálně stanovenými křivkami zatížení. Při aplikaci dalšího zatížení se již projevuje vliv zvoleného konzervativního přístupu při modelování porušených konečných prvků, které byly při indikaci porušení z dalšího výpočtu vyloučeny. K porušení zkušebních těles i tělesa 0 (Obr. 14), došlo při použití všech uvažovaných kritérií porušení při působení zatížení o velikosti 2,1 kN (Obr. 15). Výjimkou bylo pouze zkušební těleso 2, u kterého došlo při uvažování Tsai-Wu kritéria k porušení

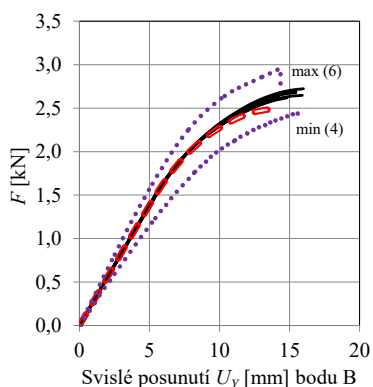
při působení zatížení o velikosti 2,05 kN. U tohoto tělesa jsou nejnepříznivěji uspořádány letokruhy v tlacené oblasti, kdy tangenciální směr T je svislý a radiální směr R je vodorovný.



Obr. 15: Pracovní diagramy ($F - U_y$).



válcové ortotropie (přístup P3 a P4), tedy nejnižší hodnoty svislého posunutí U_Y bodu B, vznikají v případě použití Tsai-Wu kritéria porušení. Naopak nejvyšší hodnoty svislého posunutí jsou dosaženy ve většině případů při použití kritéria maximálního napětí. Rozdíly ukazují vliv nezohlednění vzájemné vazby mezi normálovými složkami napětí, a také ani mezi složkami normálových a smykových napětí v rámci kritérií porušení.

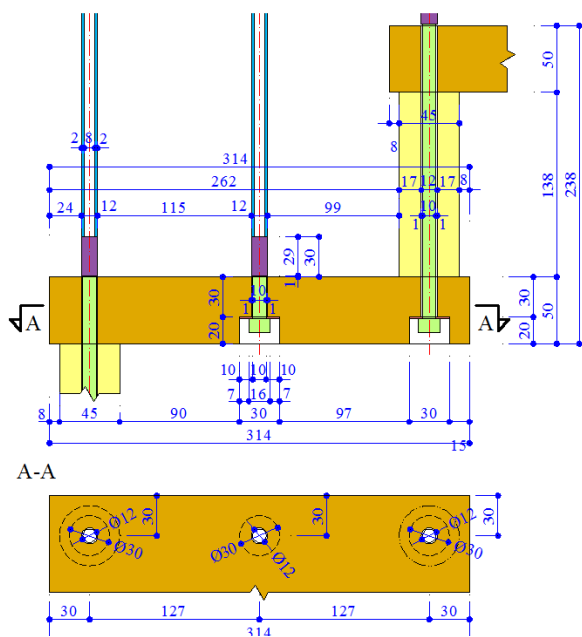


Obr. 17: Pracovní diagram ($F - U_Y$).

letokruhů se výrazně neprojevuje na průběhu zatěžovacích křivek, jelikož průběh zatěžovací křivky tělesa 0 přibližně odpovídá průběhům zatěžovacích křivek zkušebních těles určených pomocí přístupu P7. Všechny zatěžovací křivky současně leží uvnitř intervalu experimentálně naměřených zatěžovacích křivek. Vliv letokruhů je však patrný v případě velikosti síly na mezi porušení a odpovídajícího svislého posunutí U_Y bodu B (Obr. 17), kdy zatěžovací křivky určené pomocí přístupu P7 lépe popisují chování zkušebních těles než při použití přístupu P8.

Z uvedených rozborů lze vyslovit závěr, že v případech, ve kterých je úroveň působícího zatížení pod úrovní, při které dochází k porušení materiálu dřeva, je možné vliv letokruhů zanedbat, tedy použít přístup P4 oproti časově náročnějšímu přístupu P3 s uvažováním vlivu letokruhů. V případech, ve kterých je úroveň působícího zatížení nad úrovní, při které dochází k porušení materiálu dřeva, např. při modelování zatěžovacích zkoušek, numerickém určení mezní únosnosti, analýzách míst se zvýšeným namáháním atp., je vhodnější použít místo ortotropního materiálového modelu anizotropně plastický materiálový model s uvažováním vlivu letokruhů, tj.

přístup P7. V případě zanedbání vlivu letokruhů při použití anizotropně plastického materiálového modelu, tj. přístup P8, lze očekávat nižší hodnoty sledovaných veličin než při použití přístupu P7.



Obr. 18: Výkresová dokumentace.

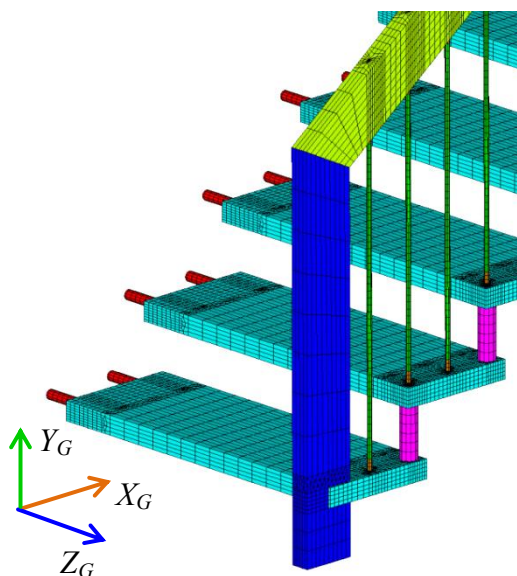
5 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO SCHODIŠTĚ

Za účelem studia chování segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni (Obr. 1) bylo zvoleno přímé schodiště z borovice lesní, které představuje ze statického hlediska nejneprůzračnější případ geometrického uspořádání [37].

Schodiště mělo konstrukční výšku 3,0 m, šikmé rozpětí 4,784 m, půdorysný průmět 3,845 m a sklon 36,507°. Schodiště bylo tvořeno 15 stupni délky 0,9 m, šířky 0,314 m a tloušťky 0,05 m (Obr. 18). Délka stupňů vycházela z požadavku

ČSN 73 4130. Stupně byly na výstupní čáře předsazeny o 0,061 m. Stupně byly na straně nosné zdi uloženy pomocí soustavy ocelových trnů $\varnothing 16$ mm a pryžových pouzder (Obr. 2a). Na vnější straně byly stupně zavěšeny pomocí soustavy 24 ks ocelových táhel profilu $\varnothing 12 / 2$ mm do masivního madla o rozměru $0,140 \times 0,050$ m, které vynáší na vnější straně celé schodiště. Každý ze stupňů je zavěšen na třech ocelových táhlech. Stupně jsou současně vzájemně spojeny pomocí distančních válečků (Obr. 2b) a (Obr. 18), kterými prochází šrouby M10 s imbusovou hlavou.

5.1 IDENTIFIKACE MÍST SE ZVÝŠENÝM NAMÁHÁNÍM



Obr. 19: Výpočtový model.

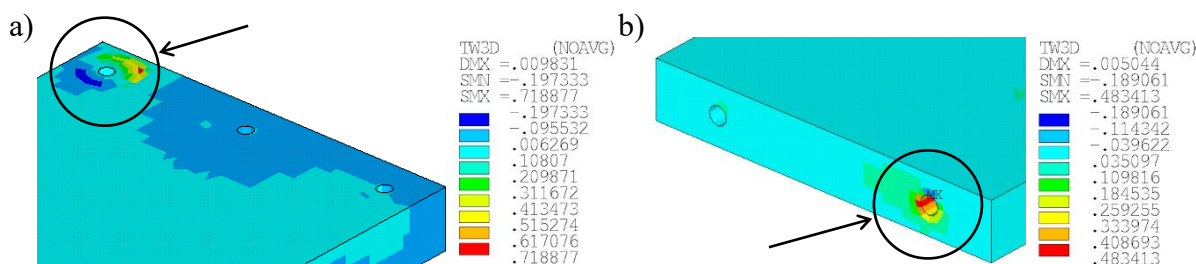
K analýze chování segmentového schodiště byl ve výpočtovém systému ANSYS vytvořen pomocí 3D konečných prvků typu SOLID45, SOLID92, SOLID95 a SURF154 výpočtový model (Obr. 19), ve kterém byly prostorově modelovány všechny konstrukční části.

K popisu chování dřevěných částí schodiště, tj. stupňů, distančních válečků, madla a sloupků, byl použit ortotropní materiálový model při zanedbání průběhu letokruhů (Obr. 7d) s $\alpha = 0^\circ$ a s elastickými konstantami podle (Tab. 3). Chování materiálu nedřevěných částí, tj. ocelových táhel, ocelových trnů, šroubů, podložek a pryžových pouzder bylo popsáno pomocí izotropního materiálového modelu s konstantami: $E = 210$ GPa, $\nu = 0,33$ pro ocel a $E = 10$ MPa, $\nu = 0,475$ pro pryž [13].

Výpočtový model byl zatížen podle ČSN 73 0035 silovým zatížením, které bylo rozděleno na zatížení stálé, tj. vlastní tíha G_0 a nahodilá zatížení, tj. užité nahodilé zatížení $V = 3$ kN/m² a nahodilé soustředěné zatížení stupně V_{os} a madla M_{os} . Pomocí těchto zatížení bylo vytvořeno celkem 5 kombinací zatěžovacích stavů.

Při výpočtech, které byly materiálově lineární a geometricky nelineární bylo pro predikci porušení resp. pro predikci míst se zvýšeným namáháním použito v kombinaci se zvoleným materiálovým modelem Hoffmanovo a Tsai-Wu kritérium porušení.

V rámci vyhodnocení bylo zjištěno, že extrémní globální účinky v konstrukci analyzovaného segmentového schodiště vyvolává kombinace K1 vlastní tíhy G_0 ($\gamma_f = 1,1$) a užitého rovnoměrného zatížením V ($\gamma_f = 1,3$) působící na všech stupních schodiště. Při tomto způsobu zatížení došlo v polovině šikmého rozpětí na stupni č. 8, ke svislému posunutí o velikosti 9,2 mm.



Obr. 20: Výstup Tsa-Wu kritéria.

Pomocí kritérií porušení bylo zjištěno, že k největšímu namáhání dochází v místě vzájemného spojení stupňů pomocí distančních válečků, kde Hoffmanovo kritérium resp. Tsai-Wu kritérium dosahovalo pro kombinaci K1 hodnoty 0,63 resp. 0,71 z maximální hodnoty 1,0 (Obr. 20a). Dalším místem, kde by podle kritérií mohlo dojít k porušení stupňů, bylo místo uložení stupňů na ocelové trny. Zde dosahovaly obě kritéria pro kombinaci K2 vlastní tíhy G_0 ($\gamma_f = 1,1$) a

soustředěného zatížení stupně V_{os} ($\gamma_f = 1,2$) v polovině stupně č. 8 u výstupní hrany stupně shodně hodnoty 0,48 (Obr. 20b).

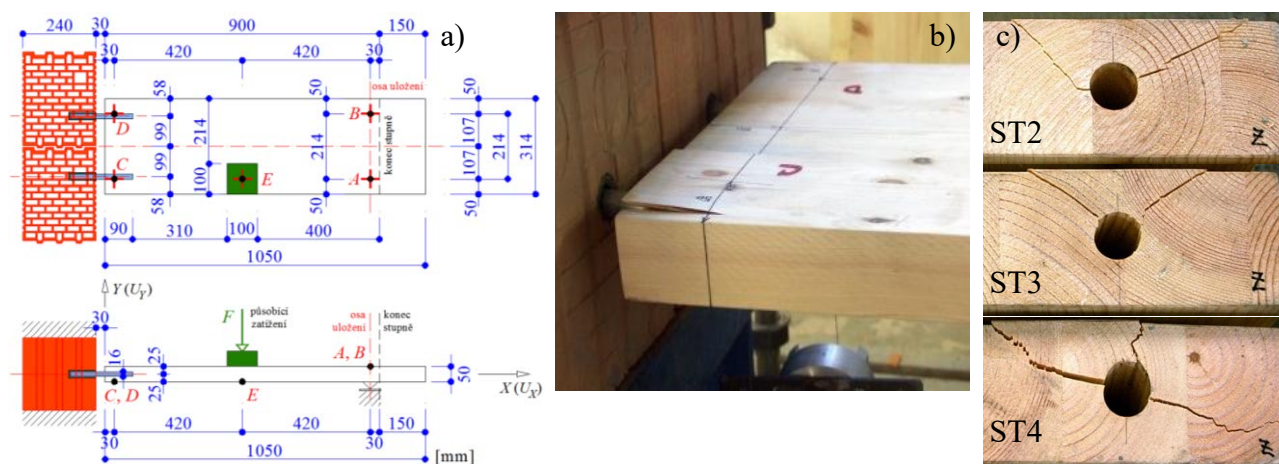
Reálná únosnost a chování míst zobrazených na (Obr. 20) byla zjištěna pomocí experimentálních zkoušek výsekových modelů v měřítku 1:1. Kromě těchto míst bylo zkoušeno uložení stupně pomocí 2 ks ocelových táhel a spoj ocelového táhla s madlem.

6 ANALÝZA MÍST SE ZVÝŠENÝM NAMÁHÁNÍM

6.1 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

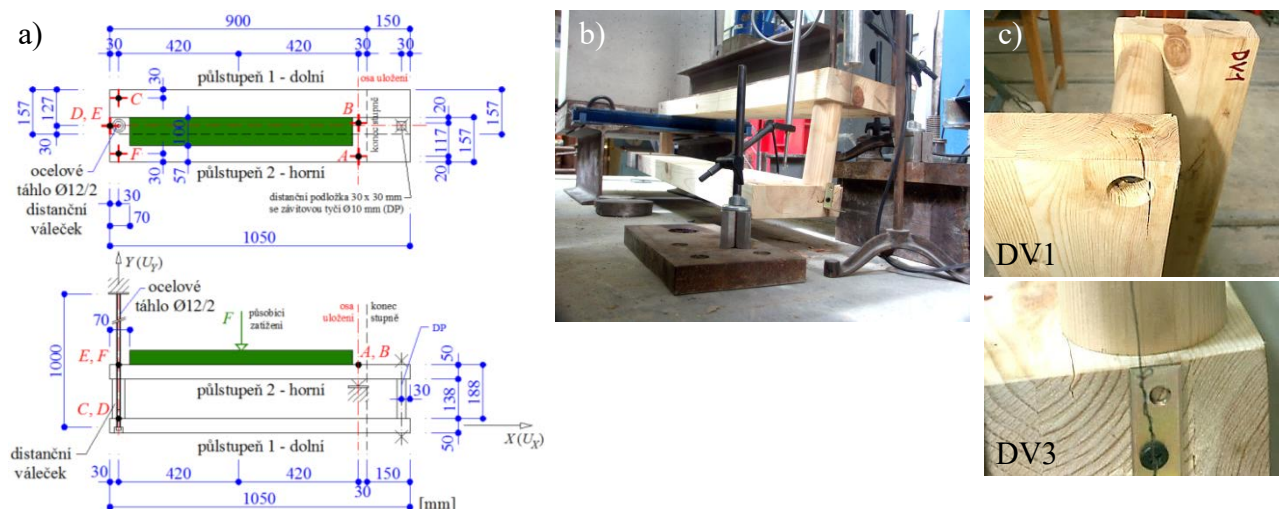
6.1.1 Zkouška ZK1

Uspořádání experimentální zkoušky ZK1, tj. místa uložení stupně do zdi pomocí 2 ks ocelových trnů v množství 3 ks vzorků (označených ST2, ST3, ST4), je zobrazeno na (Obr. 21a).



Obr. 21: Uspořádání experimentální zkoušky ZK1 (a), detail porušení vzorku ST2 v místě ocelového trnu (b) a pohledy na průběh porušení na čelech stupňů (c).

Při poškození všech zkoušených vzorků došlo k vyštípnutí v místě ocelového trnu, který je umístěn blíže k místu působícího zatížení, tj. ocelového trnu u měřicího bodu C (Obr. 21). Průběh porušení na čelech stupňů je zobrazen na (Obr. 21c). Velikosti sil, při porušení vzorků a odpovídající velikosti svislého posunutí $U_{Y,E}$ v měřicím bodě E jsou uvedeny v (Tab. 6).



Obr. 22: Uspořádání experimentální zkoušky ZK2 (a), pohled na vzorek DV1 v průběhu zkoušky (b) a pohledy na částečně porušený vzorek DV1 a DV3 (c).

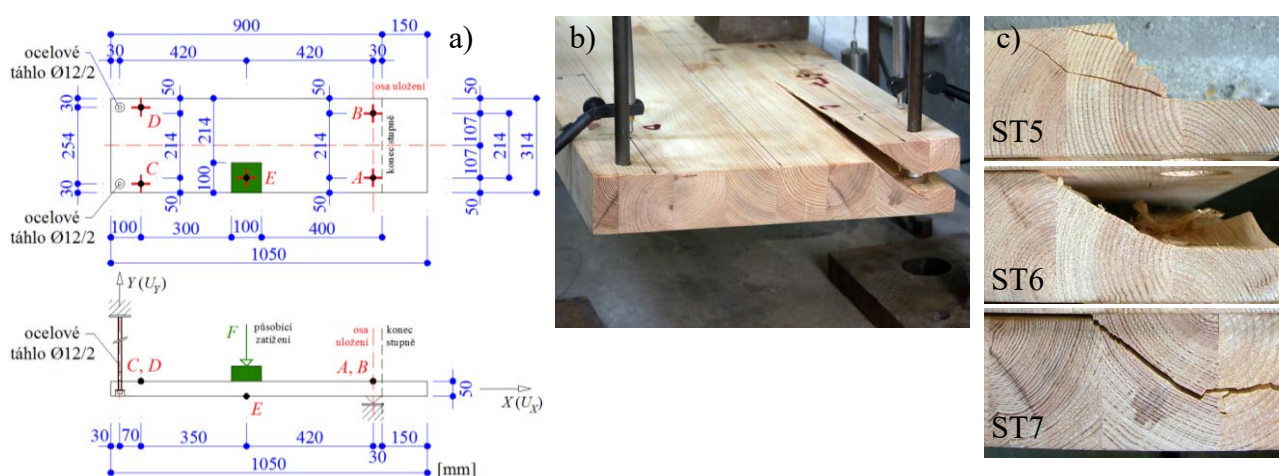
6.1.2 Zkouška ZK2

Uspořádání experimentální zkoušky ZK2, tj. místa spojení stupňů pomocí distančního válečku a ocelového táhla v množství 3 ks vzorků (označených DV1, DV2, DV3), je zobrazeno na (Obr. 22a).

Při testech nedošlo k porušení zkoušených vzorků. Testování bylo ukončeno před dosažením mezního stavu únosnosti z důvodu bezpečnosti práce, jelikož hrozilo při narůstajícím svislém posunutí vybočení tenzometrického siloměru. K částečnému porušení došlo u vzorku DV1 a DV3 jak je zobrazeno na (Obr. 22c). Velikosti sil při porušení vzorků a odpovídající velikosti svislého posunutí $U_{Y,E}$ v měřicím bodě E jsou uvedeny v (Tab. 6).

6.1.3 Zkouška ZK3

Uspořádání experimentální zkoušky ZK3, tj. místa uložení stupně pomocí 2 ks ocelových táhel v množství 3 ks vzorků (označených ST5, ST6, ST7), je zobrazeno na (Obr. 23a).

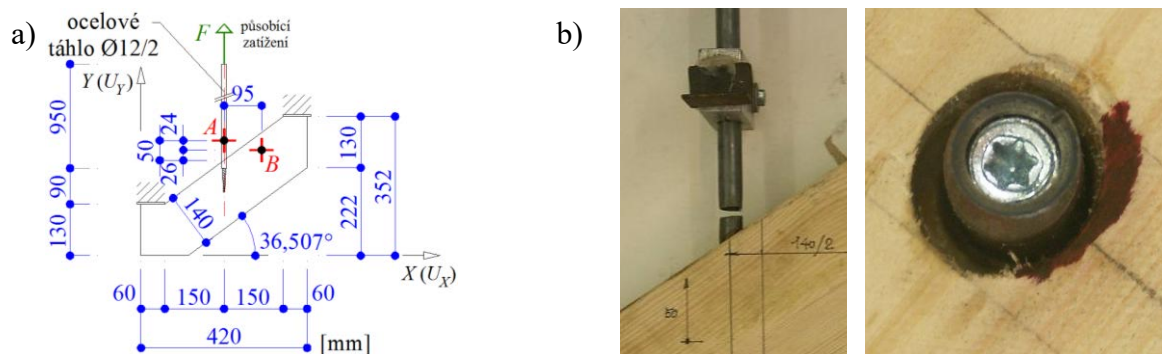


Obr. 23: Uspořádání experimentální zkoušky ZK3 (a), pohled na vzorek ST7 při porušení (b) a pohledy na porušené vzorky ST5, ST6 a ST7 (c).

Charakter porušení všech zkoušených vzorků zobrazený na (Obr. 23c) je u všech vzorků podobný. Velikosti sil při porušení vzorků a jim odpovídající velikosti svislého posunutí $U_{Y,E}$ v měřicím bodě E jsou uvedeny v (Tab. 6).

6.1.4 Zkouška ZK4

Uspořádání experimentální zkoušky ZK4, tj. spoje ocelového táhla s madlem v množství 3 kusů vzorků (S1, S2, S3), je zobrazeno na (Obr. 24a).



Obr. 24: Uspořádání experimentální zkoušky ZK4 (a) a pohled na vzorek S1 při porušení (b).

K porušení všech zkoušených vzorků došlo přetržením ocelového táhla nad koncem vzájemného spojení ocelového táhla s kombišroubem M8 × 100 mm TORX (Obr. 24b). Velikosti sil při porušení vzorků a jim odpovídající velikosti rozdílu svislého posunutí $U_{Y,AB}$ měřících bodů A a B jsou uvedeny v (Tab. 6).

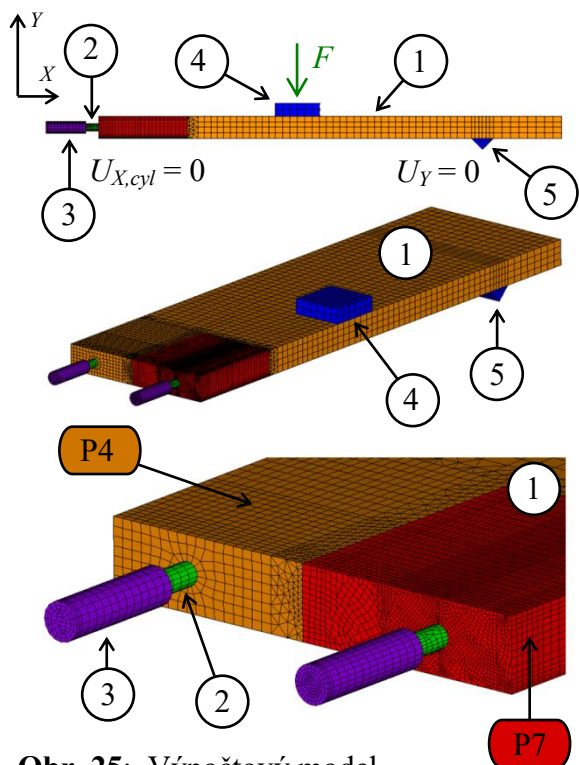
Tab. 6: Výsledky experimentálních zkoušek.

Vzorek	$F / U_{Y,E}$	Vzorek	$F / U_{Y,E}$	Vzorek	$F / U_{Y,E}$	Vzorek	$F / U_{Y,AB}$
ST2	6,983 / 5,435	DV1	33,451 / 32,356	ST5	17,904 / 14,309	S1	14,516 / 1,650
ST3	5,695 / 6,313	DV2	31,802 / 31,934	ST6	18,914 / 9,386*	S2	14,475 / 1,795
ST4	8,330 / 9,390	DV3	34,102 / 34,838	ST7	14,083 / 10,616	S3	13,625 / 3,586
Průměr	7,003 / 7,046	Průměr	33,118 / 33,043	Průměr	16,967 / 12,463	Průměr	14,205 / 2,344

Poznámka: U vzorku ST6 (*) došlo k poruše měřícího čidla. Hodnota není u svislého posunutí zahrnuta do průměru.

6.1.5 Vyhodnocení zkoušek ZK1, ZK2, ZK3 a ZK4

Vzájemným porovnáním sil při porušení resp. ukončení experimentálních zkoušek ZK1 až ZK4 bylo zjištěno, že nejkritičtější místem z množiny zkoušených detailů je detail uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů. Při zkoušce tohoto detailu došlo k jeho porušení průměrně při působení síly o velikosti $F = 7,003$ kN (Tab. 6). Zjištěné způsoby porušení zkoušených vzorků také potvrzují, že výsledné hodnoty sil při porušení jsou ovlivněny uspořádáním letokruhů, což je patrné z (Obr. 21c) a (Obr. 23c).



Obr. 25: Výpočtový model.

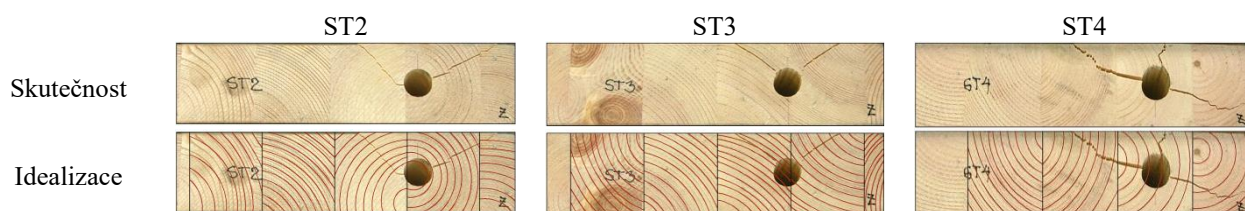
6.2 NUMERICKÁ ANALÝZA

Za účelem ověření elastických a materiálových konstant uvedených v (Tab. 3) a (Tab. 4) a možnosti použití vzájemné kombinace rozdílných přístupů (přístupu P4 a P7) modelování dřevěných prvků (Tab. 1) v rámci jednoho výpočtového modelu resp. vzájemného porovnání výsledků experimentálních zkoušek s výsledky numerického modelování byla provedena numerická analýza kritického místa, tj. uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů.

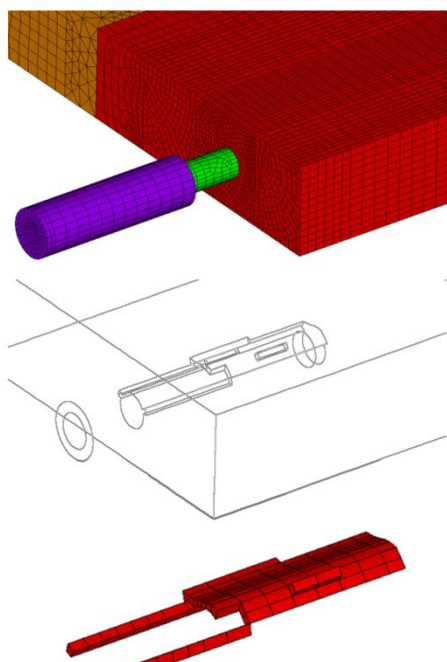
K analýze chování kritického místa byly ve výpočtovém systému ANSYS vytvořeny pomocí 3D konečných prvků typu SOLID45, SOLID95, SURF154, TARGE170 a CONTA174 tři výpočtové modely (Obr. 25), ve kterých byly prostorově modelovány všechny konstrukční části, tj. (1) stupeň, (2) ocelové trny, (3) pryžová pouzdra, (4) ocelová roznášecí deska a (5) ocelový podpurný přípravek. Rozměry výpočtových modelů jsou uvedeny na (Obr. 21a).

Při modelování dřevěného stupně byly vzájemně kombinovány dva přístupy modelování dřevěných prvků, přístup P4 resp. P7 (Obr. 25). V části stupně, kde při experimentálních zkouškách nedošlo k porušení, byl uvažován přístup P4, ve kterém je chování dřeva popsáno ortotropním materiálovým modelem s predikcí porušení dřeva pomocí Tsai-Wu kritéria a neuvažováním vlivu letokruhů (Obr. 7d) s $\alpha = 0^\circ$ a s konstantami podle (Tab. 3). V místě stupně, kde při experimentálních zkouškách došlo k porušení, byl uvažován přístup P7, ve kterém bylo

chování dřeva popsáno anizotropně plastickým materiálovým modelem s predikcí porušení dřeva pomocí kritéria maximálního napětí a uvažováním vlivu letokruhů (Obr. 7b) a s konstantami podle (Tab. 3) a (Tab. 4). Orientace a uspořádání letokruhů byla idealizována v celé oblasti pomocí uspořádání letokruhů na čele zkušebních těles ST2, ST3 a ST4 (Obr. 26).



Obr. 26: Idealizace průběhu letokruhů zkušebních těles ST2, ST3 a ST4 v místě ocelového trnu.



Obr. 27: Porušení tělesa ST4.

Chování materiálu nedřevěných částí, tj. ocelových trnů, roznášecí desky, podpůrného přípravku a pryžových pouzder bylo popsáno pomocí izotropního materiálového modelu s konstantami: $E = 210$ GPa, $\nu = 0,33$ pro ocel a $E = 10$ MPa, $\nu = 0,475$ pro pryž [13]. Okrajové podmínky byly uvažovány tak, aby modelovaly reálné stupně na zatěžovací dráze. Spojení stupně s podpůrným přípravkem bylo modelováno pomocí kontaktních konečných prvků typu TARGE170 a CONTA174 s uvažováním standardního chování kontaktu. Spojení ocelových trnů se stupněm bylo na základě analýzy výseku části stupně a ocelového trnu uvažováno pouze v horní části ve 120° výseči.

Výpočet byl vzhledem k použití anizotropně plastického materiálového modelu materiálově nelineární. Při výpočtu byla uvažována také geometrická nelinearita, jejíž použití bylo podmíněno i použitím kontaktních prvků.

K porušení všech zkušebních těles došlo i v případě numerického modelování v místě uložení stupně na ocelový trn, který je blíže místu působícího zatížení resp. u měřícího bodu C (Obr. 21a). Příklad porušení resp. porušených konečných prvků u výpočtového modelu ST4 je zobrazen na (Obr. 27). Velikosti maximálních sil, při kterých došlo při numerickém modelování k porušení zkušebních těles ST2, ST3 a ST4 jsou uvedeny v (Tab. 7). Rozdíl mezi experimentálně a numericky zjištěnou velikostí maximální síly je v případě zkušebního tělesa ST2 +9,65 %, ST3 -9,20 % a ST4 -17,52 %. Zkušební vzorky se při experimentální zkoušce průměrně porušily při působení průměrné síly o velikosti $F = 7,003$ kN. Průměrná síla zjištěná numerickým modelováním byla o 6,2 % vyšší a má velikost $F = 7,439$ kN.

Tab. 7: Výsledky experimentálních zkoušek a numerického modelování.

		ST2	ST3	ST4	ST0
Experimentální zkouška (E_F)	F [kN]	6,983	5,695	8,330	–
Průměr z ST2, ST3 a ST4			7,003		–
Numerické modelování (N_F)	F [kN]	6,309	6,219	9,789	7,131
Průměr z ST2, ST3 a ST4			7,439		–
Odchylka mezi E_F a N_F	[%]	+9,65	-9,20	-17,52	–

Tab. 8: Výsledky experimentálních zkoušek a numerického modelování.

		ST2	ST3	ST4	ST0
Experimentální zkouška (E_U)	$U_{Y,E}$ [mm]	4,140	5,211	8,362	–
Průměr z ST2, ST3 a ST4			5,904		–
Numerické modelování (N_U)	$U_{Y,E}$ [mm]	4,005	4,142	7,198	4,078
Průměr z ST2, ST3 a ST4			5,115		–
Odchylka mezi E_U a N_U	[%]	+3,26	+20,51	+13,92	–

Z hodnot svislého posunutí $U_{Y,E}$ bodu E (Obr. 21a) uvedených v (Tab. 8) je zřejmé, že výpočtové modely jsou tužší než zkoušené vzorky. Experimentálně zjištěné hodnoty svislého posunutí jsou vyšší než hodnoty zjištěné numerickou analýzou. Rozdíl je v případě zkušebního tělesa ST2 3,26 %, ST3 20,51 % a ST4 13,92 %; průměrný rozdíl je 12,56 %.

Pro porovnání přístupů modelování jsou v (Tab. 7) a (Tab. 8) uvedeny také hodnoty zjištěné pomocí výpočtového modelu ST0, ve kterém byla použita kombinace přístupů P4 a P8 (Tab. 1), tedy kombinace popisu chování dřeva pomocí pravoúhle ortotropního a pravoúhle anizotropně plastického materiálového modelu. Hodnota síly při porušení $F = 7,131$ kN byla o 4,14 % nižší než průměrná síla při použití přístupu P4 a P7, a o 1,79 % vyšší ve srovnání s průměrnou silou určenou pomocí experimentálních zkoušek. Hodnota svislého posunutí $U_{Y,E} = 4,078$ mm byla o 20,27 % nižší než průměrné svislé posunutí při použití přístupu P4 a P7, a o 30,93 % nižší ve srovnání s průměrným svislým posunutím určeným pomocí experimentálních zkoušek.

Výsledky numerického modelování potvrdily možnost vzájemné kombinace rozdílných přístupů (P4 a P7 resp. P4 a P8) při modelování v rámci jednoho výpočtového modelu. V případě, kdy nejsou známy nebo není možné idealizovat průběhy letokruhů lze použít pro modelování zjednodušení ve formě použití přístupu P8, u kterého je vliv letokruhů zanedbán. Shoda výsledků numerického modelování s experimentálními testy umožnila odstranit časově a finančně náročné experimentální testování a nahradit je numerickým modelováním.

**Obr. 28:** Variantní připevnění stupňů.

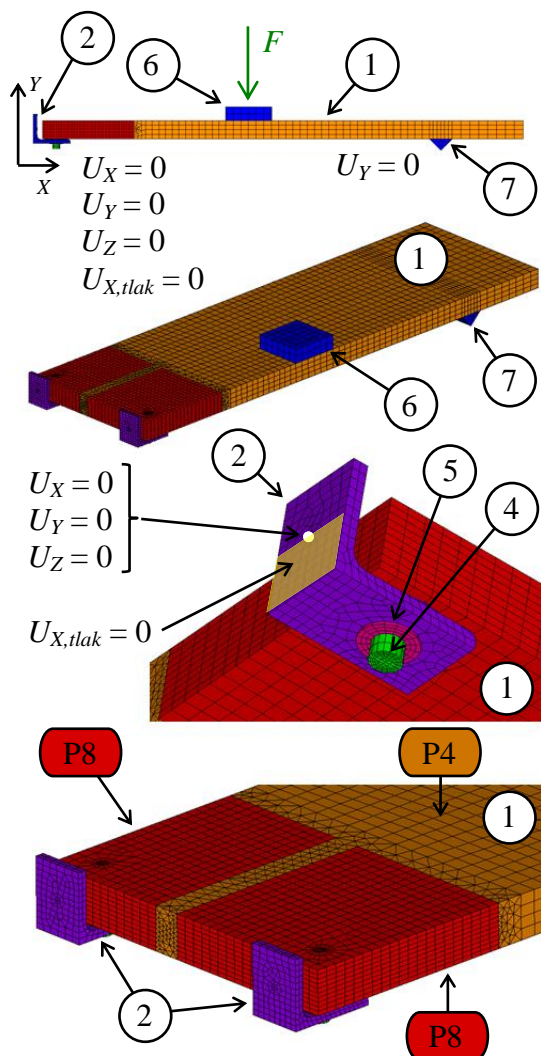
je zobrazeno na (Obr. 31). Další úpravou byla změněna tloušťka stupňů z původní tloušťky 50 mm na 40 mm. Z důvodu změny tloušťky stupňů, výsledků experimentálních zkoušek a numerického modelování detailu uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů byl změněn způsob připevnění stupňů k nosné zdi. Připevnění stupňů k nosné zdi bylo navrženo ve dvou variantách. Obě varianty

7 MODIFIKACE

Na základě výsledků numerické analýzy schodiště, experimentálních zkoušek míst se zvýšeným namáháním a numerického ověření chování detailu uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů byla realizována úprava segmentového schodiště. Cílem úpravy bylo zlepšení univerzálnosti a použitelnosti segmentového schodiště a zlepšení variability konstrukčního systému. Současně byla snaha docílit snížení nákladů na výrobu schodiště úsporou materiálu a zjednodušením montáže.

V rámci úpravy byla navržena redukce počtu ocelových táhel z 24 ks na 4 kusy na celé schodiště jak

přípevnění byly provedeny tak, aby materiál stupně v místě uložení nebyl oslaben otvory, které by měly vliv na jeho únosnost (Obr. 28). Ve variantě A (Obr. 28a) jsou stupně podepřeny resp. uloženy u nástupní hrany na ocelový válcovaný profil L 80 × 60 × 8 mm délky 50 mm. U výstupní hrany jsou spojeny s ocelovým válcovaným profilem následujícího stupně pomocí modifikovaného distančního válečku. Ve variantě B (Obr. 28b) jsou stupně podepřeny resp. uloženy nezávisle na ostatních stupních pomocí dvou ocelových válcovaných profilů L 80 × 60 × 8 mm délky 50 mm umístěných u nástupní a výstupní hrany stupně. Stupně jsou na ocelové válcované L profily uloženy přes pryžové podložky a jsou s profily spojeny pomocí šroubů M10 zašroubovaných do závrtných matic M10 × 25 mm ve stupních.



Obr. 29: Výpočtový model.

konečných prvků typu SOLID45, SOLID95, SURF154, TARGE170 a CONTA174 výpočtový model (Obr. 29), ve kterých byly prostorově modelovány všechny konstrukční části, tj. (1) stupeň, (2) ocelový válcovaný profil L 80 × 60 × 8 mm, (3) pryžové podložky $\varnothing 50 / 10,5 / 1,5$ mm, (4) šrouby M10 s imbusovou hlavou, (5) podložky $\varnothing 30 / 10,5 / 1,5$ mm, (6) ocelová roznášecí deska a (7) ocelový podpurný přípravek. Rozměry výpočtového modelu jsou uvedeny na (Obr. 21a).

Při modelování dřevěného stupně byly vzájemně kombinovány dva přístupy modelování dřevěných prvků, přístup P4 resp. P8 (Obr. 29). V části stupně, kde při experimentálních zkouškách nedošlo k porušení, byl uvažován přístup P4, ve kterém je chování dřeva popsáno ortotropním materiálovým modelem s predikcí porušení dřeva pomocí Tsai-Wu kritéria a neuvažováním vlivu letokruhů (Obr. 7d) s $\alpha = 0^\circ$ a s konstantami podle (Tab. 3). V místě stupně,

V rámci úpravy byla také navržena modifikace distančních válečků navržení jejich výškové rektifikace a změny jejich materiálu (nerezová ocel) a úprava konstrukčního spoje styku sloupku u nástupního a výstupního stupně s madlem, v rámci které bylo navrženo doplnění lepeného kolíkového spoje o vnitřní kombišroub M10 s půlměsícovou podložkou.

Navržené úpravy byly numericky analyzovány. Po jejich ověření byly následně začleněny do dvou prototypů přímého segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni, které byly experimentálně zkoušeny v měřítku 1:1.

7.1 NUMERICKÉ OVĚŘENÍ ÚPRAVY DETAILU

S ohledem na shodu výsledků numerického modelování s experimentálními testy detailu uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů bylo experimentální zkoušení navržené úpravy tohoto detailu ve variantě B (Obr. 28b) nahrazeno numerickým modelováním. Výstupem modelování bylo ověření vhodnosti navržených úprav a stanovení, jakým způsobem bude docházet k porušení detailu, u kterého byl změněn způsob přípevnění stupně do nosné stěny, a byla současně změněna tloušťka stupně z původní hodnoty 50 mm na 40 mm.

K analýze chování upraveného detailu byl ve výpočtovém systému ANSYS vytvořen pomocí 3D

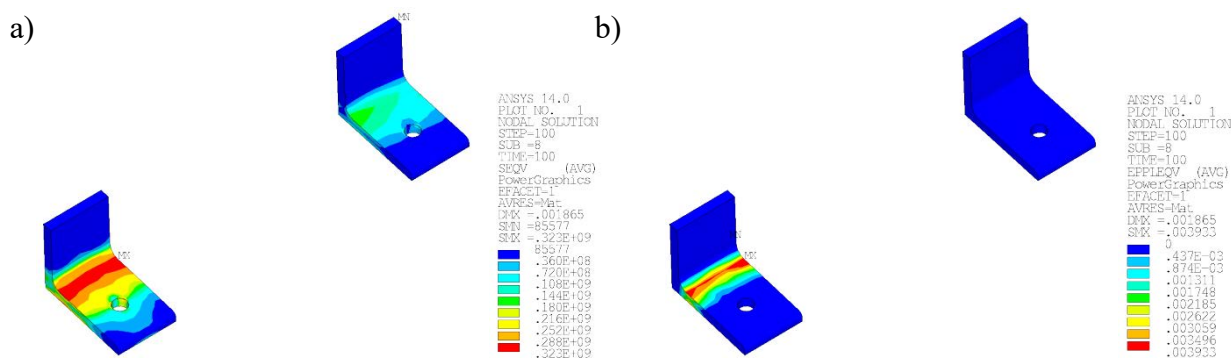
kde se předpokládá vznik poruch, byl uvažován přístup P8, ve kterém je chování dřeva popsáno anizotropně plastickým materiálovým modelem s predikcí porušení dřeva pomocí kritéria maximálního napětí a bez vlivu letokruhů (Obr. 7d) s $\alpha = 0^\circ$ a s konstantami podle (Tab. 3) a (Tab. 4).

Chování materiálu nedřevěných částí, tj. ocelové roznášecí desky, podpůrného přípravku a pryžových pouzder bylo popsáno pomocí izotropního materiálového modelu s konstantami: $E = 210$ GPa, $\nu = 0,33$ pro ocel a $E = 10$ MPa, $\nu = 0,475$ pro pryž [13]. K popisu chování materiálu šroubů M10 s imbusovou hlavou byl použit bilineárně izotropní materiálový model bez zpevnění v tahu i tlaku ($E = 210$ GPa, $\nu = 0,33$, $\sigma_y = 640$ MPa). Bilineárně izotropní materiálový model byl uvažován také při modelování chování ocelového válcovaného profilu L. V tomto případě materiálový model uvažoval tahové i tlakové zpevnění ($E = 210$ GPa, $E^T = E/10$, $\nu = 0,33$, $\sigma_y = 235$ MPa), kde E^T je modul zpevnění v tahu a tlaku).

Okrajové podmínky byly uvažovány tak, aby modelovaly reálné uložení stupně na zatěžovací dráze. Spojení stupně s podpůrným přípravkem bylo modelováno pomocí kontaktních konečných prvků typu TARGE170 a CONTA174 s uvažováním standardního chování kontaktu. Pevný kloub byl uvažován v místě přichycení ocelového válcovaného profilu L k nosné stěně. Opření L profilu, ke kterému při ohybové zkoušce dochází, bylo modelováno pomocí jednostranné okrajové podmínky působící v případě tlakového namáhání.

Vzhledem k použití anizotropně plastického materiálového modelu byl výpočet materiálově nelineární. Při výpočtu byla uvažována také geometrická nelinearita, jejíž použití bylo podmíněno i použitím kontaktních prvků.

K porušení upraveného detailu uložení stupně do zdi ve variantě B došlo v místě ocelového válcovaného profilu L, který je blíže místu působícího zatížení resp. u měřicího bodu C (Obr. 21a) při působení síly $F = 15,797$ kN. Při porušení došlo ke zplastizování příčného řezu vodorovného ramene ocelového válcovaného profilu L, jak je znázorněno na (Obr. 30) pomocí průběhu ekvivalentního napětí σ_{EQV} (Obr. 30a) a ekvivalentní plastické deformace $\varepsilon_{EQV,pl}$ (Obr. 30b) těsně před okamžikem porušení.



Obr. 30: Ekvivalentní napětí σ_{EQV} (a) a ekvivalentní plastická deformace $\varepsilon_{EQV,pl}$ (b) v ocelovém válcovaném profilu L.

Vzájemným porovnáním průměrné síly na mezi únosnosti zjištěné pomocí experimentálních zkoušek $F = 7,003$ kN (Tab. 7) uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů a síly na mezi únosnosti upraveného detailu ve variantě B $F = 15,797$ kN zjištěné numerickou analýzou lze konstatovat, že úpravou bylo dosaženo zvýšení síly na mezi únosnosti cca 2,25 násobně. Ke zvýšení síly na mezi únosnosti došlo i přes snížení tloušťky stupně z 50 mm na 40 mm. Úpravou detailu došlo také ke změně charakteru porušení. V původní variantě docházelo k porušení stupně v místě uložení na ocelový trn. V upravené variantě o únosnosti detailu rozhoduje ocelový válcovaný profil L.

Získané výsledky prokázaly možnost a vhodnost použití upraveného detailu ve variantě B. Proto tato úprava byla začleněna do prototypu segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni.

7.2 NUMERICKÉ OVĚŘENÍ SCHODIŠTĚ S NAVRŽENÝMI ÚPRAVAMI

V rámci numerického modelování byla provedena statická a dynamická (modální) analýza schodiště se všemi navrženými úpravami. Dynamická analýza byla provedena pro zjištění vlastních frekvencí schodiště a pro následné posouzení podle ETAG008 [14].

K analýze chování upraveného schodiště byl ve výpočtovém systému ANSYS vytvořen pomocí 3D konečných prvků typu MASS21, SOLID45, SOLID92, SOLID95 a SURF154 výpočtový model (Obr. 31), ve kterém byly prostorově modelovány všechny konstrukční části.

K popisu chování dřevěných částí schodiště, tj. stupňů, madla a sloupků, byl použit ortotropní materiálový model (přístup P4) při zanedbání průběhu letokruhů (Obr. 7d) s $\alpha = 0^\circ$ a s elastickými konstantami podle (Tab. 3). Přístup P4 byl uvažován s ohledem na výsledky numerické analýzy upraveného detailu ve variantě B, kdy bylo zjištěno, že o únosnosti tohoto detailu rozhoduje ocelový válcovaný profil L (kapitola 7.1). Chování materiálu nedřevěných částí, tj. ocelových táhel, distančních válečků, válcovaných L profilů, šroubů, podložek a pryžových pouzder bylo popsáno pomocí izotropního materiálového modelu s konstantami: $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,33$ pro ocel a $E = 10 \text{ MPa}$, $\nu = 0,475$ pro pryž [13].

Okrajové podmínky byly uvažovány tak, aby modelovaly reálné uložení schodiště.

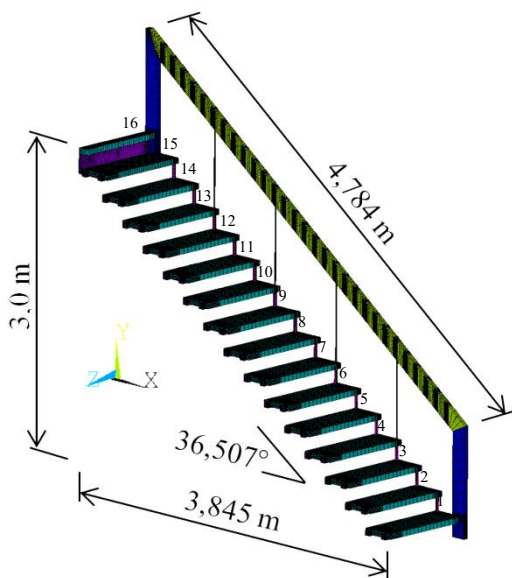
Výpočtový model byl při statické analýze zatížen zatížením odpovídající kombinaci K1 (viz kapitola 5.1). Při dynamické analýze byl výpočtový model zatížen stálým zatížením a současně bylo podle ETAG008 [14] uvažováno i dodatečné jednotkové zatížení o velikosti 1 kN přepočtené na soustředěnou hmotnost definovanou pomocí prvku MASS21. Soustředěná hmotnost byla umístěna do nejnepříznivější polohy, tj. do poloviny stupně č. 8 na straně ocelových táhel.

Statická analýza byla provedena s uvažováním Hoffmanova a Tsai-Wu kritéria porušení. Výpočet byl materiálově lineární a geometricky nelineární. Dynamická (modální) analýza, při které bylo zjištěno prvních 20 vlastních tvarů kmitů a vlastních frekvencí byla provedena pomocí blokové Lanczosovy metody iterace.

U schodiště, které obsahovalo všechny navržené úpravy (Obr. 31) bylo zjištěno, že maximální svislé posunutí U_Y od kombinace zatěžovacích stavů K1 o velikosti 9,3 mm vzniká podle (Obr. 32a) na stupni č. 7. U původního schodiště vzniklo maximální svislé posunutí o velikosti 9,2 mm podle (Obr. 32b) v polovině šikmého rozpětí schodiště, tj. na stupni č. 8.

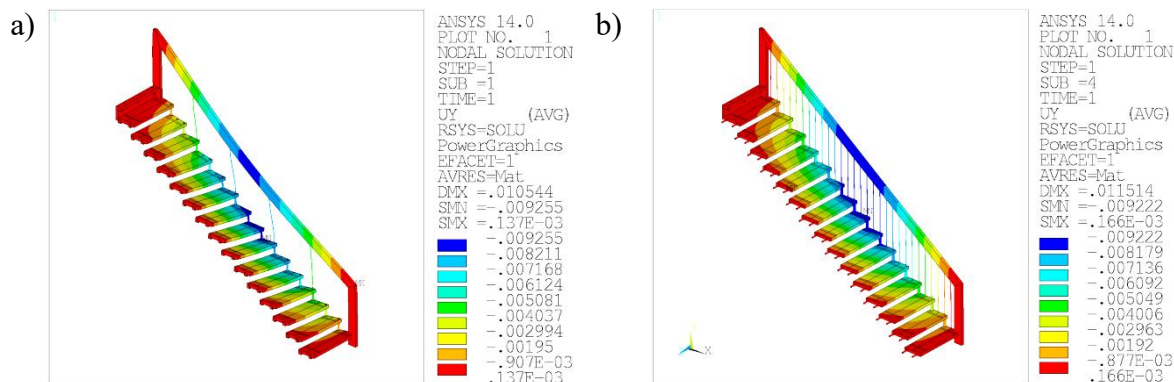
V ocelovém L profilu, který rozhodoval o únosnosti upraveného detailu ve variantě B, bylo zjištěno pro kombinaci K1 extrémní ekvivalentní napětí σ_{EQV} o velikosti 177 MPa což je hodnota nižší než mez kluzu materiálu $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$. V ocelových táhlech, jejichž počet se snížil z 24 ks na 4 ks dosahovalo lokálně v místě styku ocelového táhla se šroubem M10 s imbusovou hlavou ekvivalentní napětí σ_{EQV} hodnoty 102 MPa oproti hodnotě 65,5 MPa v případě původních 24 ks ocelových táhel.

Kontrola využití materiálu stupňů, resp. jejich možné porušení bylo zjištěno pomocí Hoffmanova a Tsai-Wu kritéria. Obě kritéria indikovala pouze lokální porušení dolních



Obr. 31: Výpočtový model.

povrchových vrstev stupně č. 12 v místě styku stupně a distančního válečku, kde dochází k otlacení stupně, což neovlivňuje celou konstrukci schodiště. Průměrně hodnoty kritérií ve stupních měly velikost do 0,14.



Obr. 32: Svislé posunutí U_Y [m] upraveného (a) a původního (b) schodiště pro kombinaci K1.

Z porovnání první vlastní frekvence (Obr. 33) je patrné, že vlivem úprav konstrukčních detailů a změnou tloušťky stupňů došlo k jejímu snížení z hodnoty 8,3591 Hz (původní varianta schodiště) na 7,4016 Hz. Obě tyto vlastní frekvence schodiště jsou vyšší než frekvence 5,0 Hz, která je uvedena jako limitní hodnota v ETAG008 [14] pro schodiště vystavené stálému zatížení i dodatečnému jednotkovému zatížení působícímu v nejnepříznivější poloze. Změnou konstrukčních detailů došlo k posunu ve tvarech vlastních kmitů, jak je zřejmé z (Obr. 33).

$TVK = 1 - f$ [Hz]		$TVK = 2 - f$ [Hz]		$TVK = 3 - f$ [Hz]		$TVK = 4 - f$ [Hz]		$TVK = 5 - f$ [Hz]	
a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)
7,402	8,359	10,021	10,201	17,202	15,757	25,714	16,478	26,092	24,746

Obr. 33: Tvary vlastních kmitů (TVK) č. 1 až č. 5 v upravené a (a) a v původní variantě (b).

Porovnáním výsledků analýzy původního schodiště a upraveného schodiště s úpravou detailu ve variantě B je patrné, že při stejném svislém posunutí od kombinace zatěžovacích stavů je využití materiálu u upraveného schodiště vyšší. U upraveného schodiště kritéria porušení indikují možné poruchy v povrchových vrstvách stupňů, které nemají výrazný vliv na únosnost konstrukce schodiště. Zjištěné závěry umožnily provést návrh experimentální zkoušky a realizovat experimentální ověření upraveného schodiště v měřítku 1:1.

8 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY UPRAVENÉHO SCHODIŠTĚ

Ve spolupráci s firmou JEMA Svitavy, a.s. byly vyrobeny v měřítku 1:1 a v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, VUT v Brně sestaveny dva prototypy přímého schodiště s jednostranně zavěšenými stupni z borovice lesní. Prototypy, v textu označené jako schodiště A (Obr. 34a) a schodiště B (Obr. 34b), měly stejnou geometrii a vzájemně se lišily pouze ve způsobu podepření resp. uložení stupňů do nosné zdi (Obr. 28). U schodiště A byla použita úprava detailu uložení stupně ve variantě A a u schodiště B úprava ve variantě B.

V rámci experimentálních zkoušek byly provedeny statické zkoušky prototypů schodišť za

účelem ověření jejich statické únosnosti při působení zatížení definovaného normou ČSN 73 0035 [7] podle metodiky ETAG008 [14], ČSN 73 2030 [8] a ČSN 73 2031 [9]. Současně byla podle ETAG008 a ISO 7892:1988 [21] provedena u schodiště A dynamická rázová zkouška madla tvrdým břemenem.

8.1 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE A MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

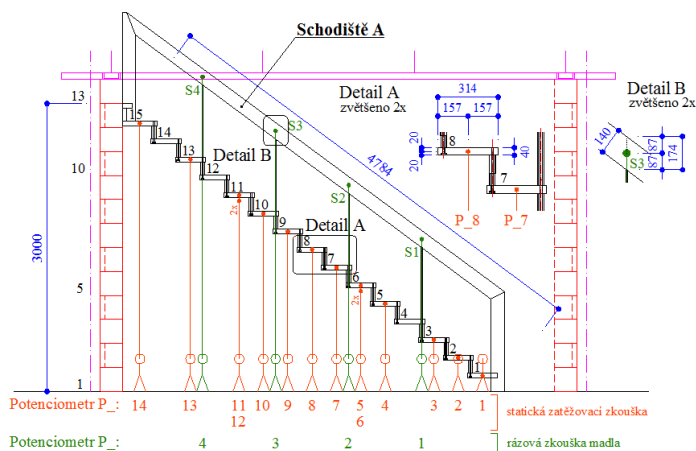
Před experimentálními zkouškami prototypů schodišť bylo nutné v prostoru laboratoře postavit podporující zděnou konstrukci tvaru Z, která sloužila k uložení stupňů a nahrazovala v laboratorních podmínkách schodišťový prostor.

Pro umístění spojitého rovnoměrného zatížení V všech stupňů schodiště (viz kombinace K1) v charakteristických a výpočtových hodnotách byly vyrobeny zatěžovací boxy z OSB desek. Boxy byly naplněny pískem odpovídající charakteristické hodnotě zatížení jednoho stupně $m = 69,8$ kg. K navýšení zatížení o 0,3 ($m = 25,4$ kg) na 1,3 násobek resp. o 0,2 ($m = 16,9$ kg) na 1,5 násobek charakteristické hodnoty zatížení jednoho stupně byly naplněny pytle s pískem, které se v průběhu zkoušek umísťovaly do zatěžovacích boxů tak, aby se průběh ohybového momentu od působícího zatížení co nejvíce blížil průběhu ohybového momentu od spojitého rovnoměrného zatížení. Odtěžování bylo provedeno v opačném pořadí zatěžování.



Obr. 34: Prototyp schodiště A (a) a B (b) v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební VUT v Brně a geometrie schodiště A a B (c).

Ke kontinuálnímu záznamu měřených údajů v čase, tj. vodorovných a svislých posunutí zvolených bodů v čase byla při experimentálních zkouškách použita měřicí ústředna HBM Spider 8 a JV-MSV. Posunutí zvolených bodů bylo sledováno pomocí 14 kusů potenciometrických snímačů dráhy typu MS04 s přesností 0,05 mm.



Obr. 35: Umístění měřicích bodů.

8.2 STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

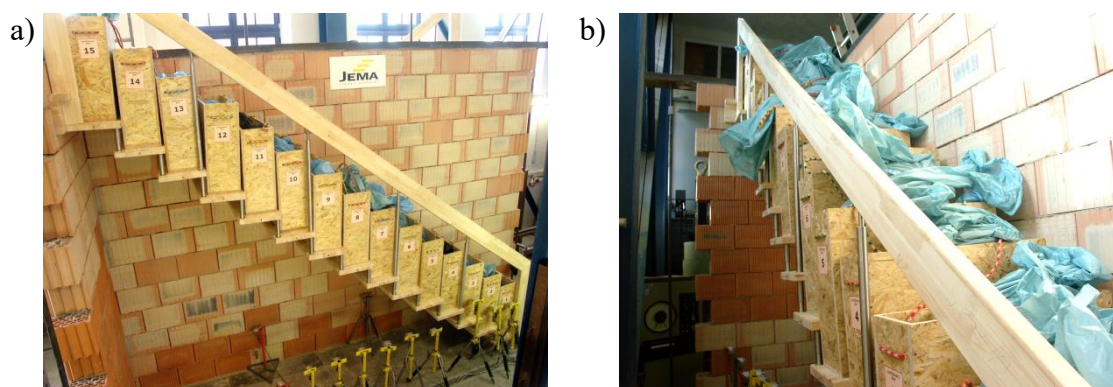
8.2.1 Schodiště A

Statická zatěžovací zkouška schodiště A (Obr. 35) a (Obr. 36a) byla rozdělena na fázi zatěžování a fázi odtěžování. Mezi jednotlivými fázemi a mezi jednotlivými zatěžovacími kroky, tj. aplikací $1,0 \times V$ a $1,3 \times V$ byla provedena měřicí přestávka v délce 15 minut, která byla navržena z důvodu ustálení měření svislých posunutí. S ohledem na velikost svislého posunutí a bezpečnost v okolí schodiště byla statická

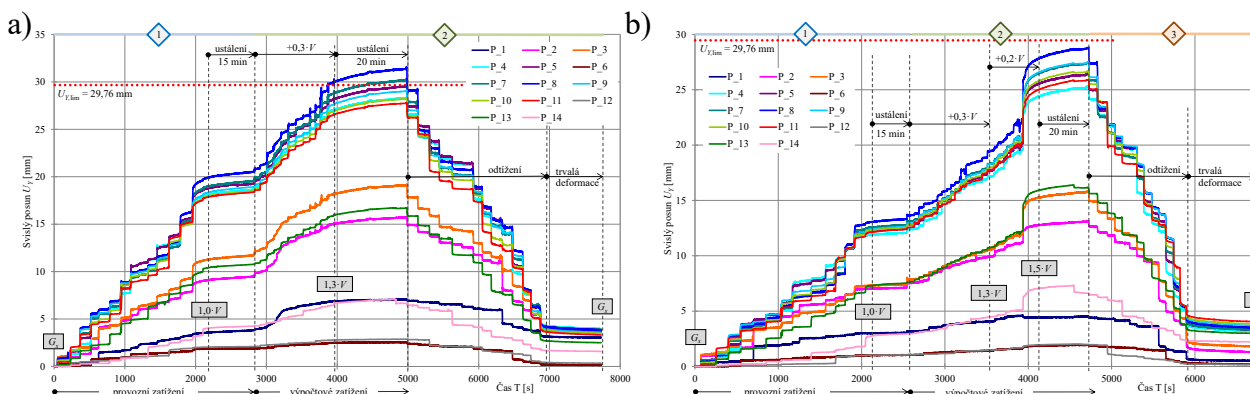
zatěžovací zkouška schodiště A ukončena při působení výpočtového užitého rovnoměrného zatížení ($V_d = 1,3 \times V$). Při uvedeném způsobu zatížení bylo na schodiště umístěno zatížení o hmotnosti 1653 kg bez uvažování vlastní tíhy schodiště.

Kontinuální průběh svislých posunutí U_Y v měřených bodech v jednotlivých fázích zatěžování a odtěžování je uveden na (Obr. 37a). Z grafu je zřejmé postupné nanášení resp. odstraňování zatížení. Extrémní hodnota svislého posunu vznikla na stupni č. 8 o velikosti 20,54 mm. Zvýšené svislé posuny se dále více projevovaly na stupni č. 5, č. 6, č. 7, č. 9, č. 10 a č. 11, tj. na stupních ve střední třetině šikmého rozpětí schodiště L_S . Po odtížení se v konstrukci vyskytovaly trvalé nevratné deformace, které v poměru k maximálním hodnotám odpovídající $1,3 \times V$ a dosahovaly průměrné hodnoty 13,7 %.

Při působení zatížení $1,3 \times V$ došlo k částečnému otevření styku madla se sloupkem u nástupního resp. výstupního stupně, který se po odtížení uzavřel. Také došlo k pootevření spáry mezi sloupkem a stupněm č. 15 a k posunu distančního válečku z dolní podložky u stupně č. 11.



Obr. 36: Statická zatěžovací zkouška schodiště A (a) a B (b).

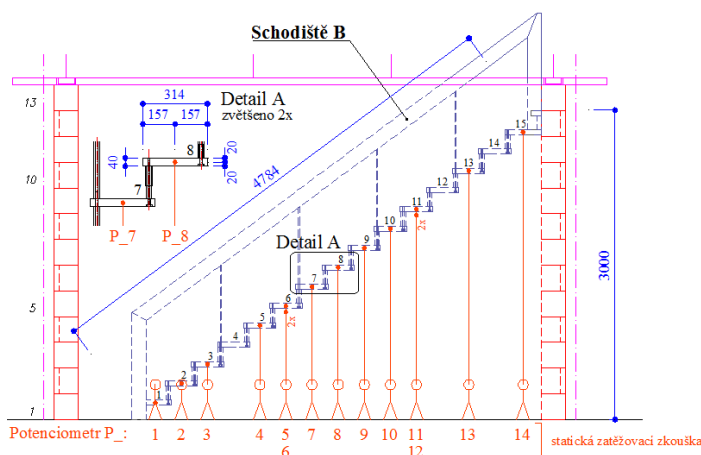


Obr. 37: Záznam svislého posunutí měřících bodů v průběhu statické zatěžovací zkoušky schodiště A (a) a B (b).

8.2.2 Schodiště B

Statická zatěžovací zkouška schodiště B (Obr. 38) a (Obr. 36b) byla rozdělena na fázi zatěžování a fázi odtěžování. Mezi jednotlivými fázemi a mezi jednotlivými zatěžovacími kroky, tj. aplikací $1,0 \times V$ a $1,3 \times V$ byla provedena měřící přestávka v délce 15 minut, která byla navržena z důvodu ustálení měření svislých posunů. S ohledem na velikost svislého posunutí bylo zatížení zvýšeno o $0,2 \times V$, tedy na velikost výpočtového užitého rovnoměrného zatížení ($V_d = 1,5 \times V$). Při uvedeném způsobu zatížení bylo na schodiště umístěno zatížení o hmotnosti 1908 kg bez uvažování vlastní tíhy schodiště.

Kontinuální průběh svislých posunutí U_Y v měřených bodech v jednotlivých fázích zatěžování a



Obr. 38: Umístění měřících bodů.

kteří v poměru k maximálním hodnotám odpovídající $1,5 \times V$ a dosahovaly průměrné hodnoty 12,8 %.

Při působení zatížení $1,5 \times V$ došlo k částečnému otevření styku madla se sloupkem u nástupního resp. výstupního stupně včetně částečného porušení profilu madla trhlinou rovnoběžnou se směrem vláken v polovině výšky madla, tj. přibližně v místě vnitřního kombišroubu. Po odtížení došlo k částečnému uzavření tohoto styku.

8.2.3 Vyhodnocení

ETAG008 [14] uvádí, že schodiště musí mít dostatečnou mechanickou odolnost a stabilitu, aby odolalo účinkům statických a dynamických zatížení, aniž by byl dosažen mezní stav použitelnosti nebo překročen mezní stav únosnosti. ETAG008 [14] připouští stanovení únosnosti pomocí mezních stavů, ale i využití experimentálních zkoušek, tak jak bylo použito v případě schodiště A i B. Při zkoušení umožňuje zatěžovat schodiště pouze do dosažení dostatečné úrovně zatížení před porušením. Není tedy nutné zatěžovat schodiště až do porušení.

Při provozních zatíženích by průhyb schodiště na straně bez stěny neměl podle ETAG008 [14] ve vztahu ke středové čáře ramene přesáhnout hodnotu $1/200$. Ohyb způsobený vodorovným zatížením se nebere v úvahu.

Tab. 9: Maximální svislé posunutí.

Schodiště	Kde max U_Y	Zatížení	max U_Y [mm]	$U_{Y,lim} = L_s / 200$ [mm]	Podmínka
A	stupeň č. 8	$1,0 \times V$	20,66	29,76	$\max U_Y < U_{Y,lim}$
B	stupeň č. 8	$1,0 \times V$	13,48	29,76	$\max U_Y < U_{Y,lim}$

Extrémní hodnoty svislého posunutí U_Y od provozního zatížení, tj. charakteristického užitého rovnoměrného zatížení o intenzitě $1,0 \times V$ vznikají u obou schodišť na stupni č. 8 (Tab. 9). Podle (Tab. 9) je podmínka spolehlivosti uvedená v ETAG008 splněna pro schodiště A i schodiště B.

Tab. 10: Maximální svislé posunutí.

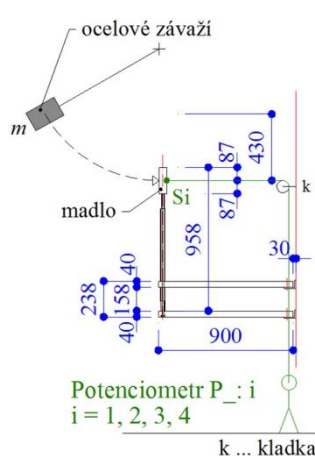
Schodiště	Kde max U_Y	$G_s + V_s$	$G_s + V_d$	G_s	P [%]	Podmínka
A	stupeň č. 8	20,66	31,05	3,87	12,5	$P < \lambda_1$
B	stupeň č. 8	13,48	28,75	3,48	12,1	$P < \lambda_1$

Podle ČSN 73 2030 [8] lze statickou zatěžovací zkoušku schodiště A a B charakterizovat jako zkoušku bez dosažení únosnosti konstrukce a zkoušku prototypovou, sloužící k ověření

spolehlivosti před zahájením výroby konstrukce. Jelikož při zkouškách nebylo dosaženo únosnosti schodišť lze vyhodnocení vyjádřit poměrem mezi trvalým a celkovým přetvořením při zatížení konstrukce na hodnotu, která odpovídá zatížení $G_s + V_d$ a následném odtížení na hodnotu, která odpovídá zatížení G_s . Podle ČSN 73 2030 [8] má být poměr menší než hodnota součinitele $\lambda_1 = 0,25$ resp. 25 %.

Hodnoty poměru mezi trvalým a celkovým přetvořením, tj. poměru přetvoření od zatížení $G_s + V_d$ a G_s pro schodiště A i B, která jsou uvedena v (Tab. 10), jsou menší než součinitel λ_1 z ČSN 73 2030 [8]. Splněním tohoto kritéria jsou podle ČSN 73 2030 [8] schodiště A i schodiště B spolehlivé z hlediska mezního stavu únosnosti.

Ze vzájemného porovnání naměřených svislých posunutí uvedených v (Tab. 9) a (Tab. 10) vyplývá, že schodiště B je tužší a lépe vzdoruje působícímu zatížení než schodiště A. Jelikož schodiště A a B se od sebe liší pouze způsobem uložení resp. připevnění stupňů k nosné zdi lze za výhodnější způsob podepření stupňů považovat uložení stupňů na dva ocelové válcované profily L 80 × 60 × 8 mm umístěné u nástupní a výstupní hrany stupně zobrazené na (Obr. 28b).



8.3 DYNAMICKÁ RÁZOVÁ ZKOUŠKA MADLA

8.3.1 Schodiště A

Po provedení statické zatěžovací zkoušky schodiště ve variantě A byla provedena podle ETAG008 [14] a ISO 7892:1988 [21] na tomto schodišti dynamická rázová zkouška madla tvrdým břemenem (Obr. 39). Provedení stejné zkoušky u schodiště ve variantě B nebylo možné realizovat z důvodu prostorových podmínek v laboratoři.

Obr. 39: Dynamická rázová zkouška madla A.

Při zkoušce narazilo ocelové závaží o hmotnosti $m = 35,45$ kg energií $E = 150$ Nm na madlo schodiště A v polovině rozpětí, tj. mezi sloupkem č. 2 a č. 3 nad stupněm č. 8 (Obr. 35) jedenkrát během jednoho cyklu zkoušky.

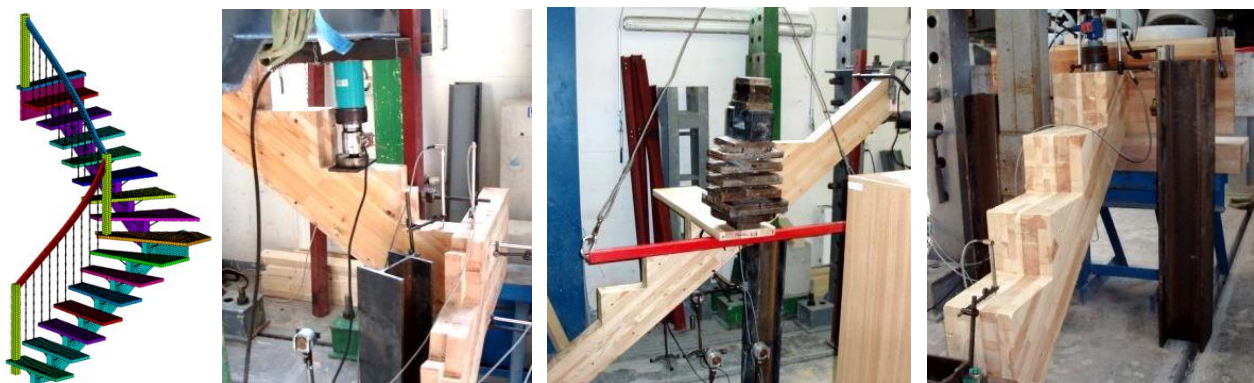
8.3.2 Vyhodnocení

Celkově byly provedeny čtyři zkušební cykly, než došlo k porušení madla. Zkouška byla prováděna postupně, tedy i na madle, které mohlo být z předcházejících zkušebních cyklů již porušeno. Vodorovné výkmity madla měly průměrně hodnotu 115 mm. Při porušení madla po rázu č. 4 došlo k porušení sloupku u výstupního stupně v místě, kde byl sloupek oslaben výřezem, kterým prochází výstupní stupeň a otvorem pro průchod kotvícího šroubu. Současně došlo také k rozštípnutí sloupku v podélném směru a příčnému vyštípnutí.

9 ZÁVĚR

Habilitační práce se zabývá analýzou chování dřevěného segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni (Obr. 34) a analýzou míst schodiště se zvýšeným namáháním. Při zpracování řešené problematiky byla použita metodika APMV, tj. Analýza – Popis – Modifikace – Verifikace. V rámci použité metodiky byla kombinována metoda numerického modelování s experimentálním testováním. Poznatky získané při řešení habilitační práce byly také využity při úpravách a modifikacích jiných typů konstrukcí dřevěných schodišť, řešené autorem

práce, tj. dřevěného zalomeného schodnicového schodiště jednou středovou schodnicí (Obr. 40) a dřevěného vřetenového schodiště bez vnější schodnice (Obr. 41).



Obr. 40: Dřevěné zalomené schodnicové schodiště jednou středovou schodnicí – numerický model a experimentální zkoušky detailů schodiště.



Obr. 41: Vřetenové schodiště bez vnější schodnice se dřevěnými a skleněnými stupni – numerický model a experimentální zkoušky detailů schodiště.

V teoretické části byly popsány přístupy modelování dřeva včetně materiálových modelů s kritérii porušení, které lze použít pro popis chování dřeva. Přístupy vycházejí z předpokladů idealizace dřeva, tj. reálného přírodního materiálu např. idealizací kmene kuželovitého tvaru válcovým tělesem, zanedbáním spirálovitého průběhu letokruhů po výšce kmene, linearizací letokruhů, zanedbáním rozdílu mezi jarním a letním dřevem a zanedbáním lokálních poruch (suků a smolníků).

Rešerší odborné literatury byly zjištěny elastické a materiálové konstanty borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), (Tab. 3). Vzhledem k jejich použití v kombinaci s anizotropně plastickým materiálovým modelem byly materiálové konstanty modifikovány (Tab. 4), aby byly splněny podmínky plastické nestlačitelnosti (4) a uzavřené plochy plasticity (5). Tyto konstanty, resp. možnost jejich použití při numerických analýzách, byly ověřeny pomocí experimentálních zkoušek dřevěných zkušebních těles (Obr. 10) v kombinaci s kontrolou možnosti jejich použití testováním hypotézy pomocí jednovýběrového *t*-testu, kdy předpoklad normality byl posouzen Shapiro-Wilksovým testem s *p*-hodnotou určenou z naměřených hodnot. Byla prokázána možnost použití publikovaných konstant pro materiál dřevěných zkušebních těles a následně i pro materiál dřevěného schodiště s jednostranně zavěšenými stupni. Tento dílčí závěr byl ověřen i pomocí spolehlivostní analýzy (Obr. 13) za předpokladu vzájemné statistické nezávislosti a 100 % statistické závislosti (koeficient korelace 1,0) vstupních veličin.

S využitím zjištěných elastických a materiálových konstant byly provedeny numerické analýzy

dřevěných zkušebních těles (Obr. 15). Při analýzách byl zanedbán vliv jarního a letního dřeva. Dřevo bylo popsáno pomocí ortotropního a anizotropně plastického materiálového modelu s uvažováním zakřivení letokruhů a zanedbáním zakřivení letokruhů. K predikci porušení dřeva byly s materiálovými modely použity neinteraktivní (kritérium maximálního napětí) a interaktivní kritéria (Hoffmanovo, Tsai-Wu) porušení. Numerické analýzy byly provedeny s využitím vytvořeného výpočtového algoritmu ve výpočtovém software ANSYS.

Vyhodnocením numerických analýz bylo zjištěno, že v případech, ve kterých je úroveň působícího zatížení pod úrovní, při které dochází k porušení materiálu dřeva, je možné použít ortotropní materiálový model s interaktivními nebo neinteraktivními kritérii porušení a zanedbat vliv letokruhů oproti časově náročnějšímu přístupu s uvažováním vlivu letokruhů. Na základě provedených analýz bylo dále zjištěno, že nejkonzervativnější výsledky poskytuje Tsai-Wu kritérium porušení. V případě, že je úroveň působícího zatížení nad úrovní, při které dochází k porušení materiálu dřeva, např. při modelování zatěžovacích zkoušek, numerickém určení mezní únosnosti atp., výsledky ukazují, že je vhodnější použít místo ortotropního materiálového modelu s interaktivními kritérii porušení anizotropně plastický materiálový model s neinteraktivním kritériem porušení, tj. kritériem maximálního napětí, s uvažováním vlivu letokruhů. Použití tohoto materiálového modelu a kritéria porušení lépe popisuje průběh zatěžovacích křivek a hodnoty mezních sil a maximálních posunutí.

V teoretické části práce byla dále provedena na přímém segmentovém schodišti s jednostranně zavěšenými stupni (Obr. 19), které představuje ze statického hlediska nejnepříznivější případ geometrického uspořádání, analýza jeho chování a současně byl zjištěn přínos vzájemného spojení stupňů prostřednictvím distančních válečků resp. přínos vzájemného spojení stupňů s madlem pomocí ocelových táhel. V rámci analýzy byly také identifikovány konstrukční detaily se zvýšeným namáháním. Jednalo se o detail uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů (Obr. 21), uložení spojení stupňů pomocí distančního válečku a ocelového táhla (Obr. 22), uložení stupně pomocí 2 ks ocelových táhel (Obr. 23) a spoje ocelového táhla s madlem (Obr. 24).

V experimentální části byly identifikované konstrukční detaily se zvýšeným namáháním experimentálně zkoušeny na výsekových modelech. Bylo zjištěno, že nejkritičtější místem z množiny zkoušených konstrukčních detailů je detail uložení stupně do zdi pomocí ocelových trnů. Zjištěné výsledky také potvrdily, že výsledné hodnoty sil při porušení jsou ovlivněny uspořádáním letokruhů. Kritický detail byl numericky analyzován (Obr. 25) s cílem jeho úpravy, opětovného ověření elastických a materiálových konstant a možnosti vzájemné kombinace rozdílných přístupů modelování dřevěných prvků v rámci jednoho výpočtového modelu. Získané výsledky potvrdily možnost vzájemně kombinovat rozdílné přístupy při modelování. Bylo dosaženo dobré shody mezi experimentem a numerickou analýzou. Rozdíl mezi experimentálně zjištěnou silou a silou zjištěnou numerickým modelováním byl 6,20 % resp. 4,14 % v případě uvažování anizotropně plastického materiálového modelu s uvažováním vlivu resp. zanedbáním vlivu letokruhů. Toto porovnání potvrdilo možnost v případě neznalosti průběhu letokruhů použít pro modelování zjednodušení ve formě přístupu, u kterého je vliv letokruhů zanedbán.

Na základě výsledků numerické analýzy schodiště, experimentálních zkoušek míst se zvýšeným namáháním a numerické analýzy kritického detailu byla navržena úprava schodiště. Jejím cílem bylo zlepšení univerzálnosti a použitelnosti schodiště. Snahou bylo dosáhnout snížení nákladů na výrobu schodiště úsporou materiálu, zjednodušením výroby a montáže. V rámci návrhu úprav došlo k redukci počtu ocelových táhel z 24 kusů na 4 kusy, změně tloušťky stupňů z původní tloušťky 50 mm na 40 mm, k modifikaci řešení distančních válečků a změny jejich materiálu a k úpravě připevnění stupňů k nosné zdi pomocí ocelových válcovaných profilů L resp. jejich kombinací s výškově nastavitelnými nerezovými distančními válečky. Navržené úpravy byly numericky analyzovány pomocí modelu kritického detailu (Obr. 29) s uvažováním navržených změn. Bylo zjištěno, že úpravou detailu bylo dosaženo zvýšení síly na mezi únosnosti cca 2,25 násobně a došlo ke změně charakteru porušení, kdy původně docházelo k porušení stupně v místě

uložení na ocelový trn a v modifikované variantě o únosnosti detailu rozhodoval ocelový válcovaný profil L.

Po dílčím ověření navržené modifikace byly všechny úpravy zakomponovány do výpočtového modelu celého schodiště (Obr. 31). Porovnáním výsledků statické analýzy původní a upravené varianty segmentového schodiště bylo možné konstatovat, že při stejném svislém posunutí od kombinace zatěžovacích stavů je využití materiálu u upraveného schodiště vyšší, což dokládají i kritéria porušení, která oproti původnímu schodišti indikují možné poruchy v povrchových vrstvách stupňů, které však nemají vliv na únosnost konstrukce schodiště. Dynamickou (modální) analýzou bylo zjištěno, že vlivem úprav konstrukčních detailů a změnou tloušťky stupňů došlo k mírnému snížení první vlastní frekvence z hodnoty 8,3591 Hz na 7,4016 Hz, která však rovněž splňuje podmínku limitní hodnoty první vlastní frekvence 5 Hz uvedená v ETAG008 [14] pro schodiště vystavené stálému zatížení i dodatečnému jednotlivému zatížení působícímu v nejnejpříznivějším místě.

Praktické ověření navržených úprav bylo s ohledem na použití přístupu APMV provedeno na dvou prototypch upravených segmentových schodišť s jednostranně zavěšenými stupni v měřítku 1:1 (Obr. 34). Varianty se od sebe vzájemně lišily ve způsobu uložení stupňů do nosné zdi. Experimentálními zkouškami bylo prakticky na reálných segmentových schodištích prokázáno, že je pro obě varianty schodišť splněna podmínka uvedená v ETAG008 [14] s rezervou 30,6 % resp. 54,7 % (Tab. 9). Současně bylo pro obě schodiště splněno kritérium spolehlivosti z hlediska mezního stavu únosnosti podle ČSN 73 2030 [8], (Tab. 10). Po úspěšném výsledku experimentálních testů byly všechny úpravy ověřeny v praxi.

10 LITERATURA

Uvedena je pouze v teziích použitá literatura.

- [1] 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.
- [2] BODIG, J. a B. A. JAYNE. *Mechanics of wood and wood composites*. Reprint ed. Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1993, XXI, 712 s. ISBN 08-946-4777-6.
- [3] BODIG, J. a J. R. GOODMAN. Prediction of Elastic Parameters for Wood. *Wood Science*. 1973, roč. 5, č. 4, s. 249–264.
- [4] Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). *Biogeografie* [online]. 2010 [cit. 2013–06–23]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps10/biogeogr/web/index_Pin_syl.html
- [5] CAMANHO, P. P. Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites. *Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites* [online]. 2002, č. 1 [cit. 2013–06–23].
- [6] CRAMER, S., D. KRETSCHMANN, R. LAKES a T. SCHMIDT. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. *Holzforschung*. 2005, roč. 59, č. 5.
- [7] ČSN 73 0035. *Zatížení stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.
- [8] ČSN 73 2030. *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [9] ČSN 73 2031. *Zkoušení stavebních objektů, konstrukcí a dílců – Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1985.
- [10] ČSN 73 4130 (73 4130). *Schodiště a šikmé rampy – Základní požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [11] DANIELSSON, H. a P. J. GUSTAFSSON. A three dimensional plasticity model for perpendicular to grain cohesive fracture in wood. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013, roč. 2013, č. 98, s. 137–152.
- [12] DINCKAL, C. Analysis of Elastic Anisotropy of Wood Material for Engineering Application. *Journal of Innovative Research in Engineering and Science*. 2011, roč. 2, č. 2.
- [13] Elastic Properties and Young Modulus for some Materials. *The Engineering Toolbox* [online]. 2012 [cit. 2013–08–27].
- [14] ETAG 008. *Prefabrikované schodišťové sestavy*. Brussels: EOTA, 2000.
- [15] FLAGA, K. Advances in materials applied in civil engineering. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, roč. 2000, č. 106, s. 173–183.
- [16] FLORIAN, A. An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 1992, roč. 7, č. 2, s. 123-130.
- [17] FLORIAN, A., J. PĚNČÍK a L. ŠEVELOVÁ. Využití výpočetních metod při simulaci experimentálních zkoušek konstrukcí po sanaci poškozených částí. *Stavební obzor*. 2006, roč. 15, č. 9, s. 268–274. ISSN 1210-4027.
- [18] GILLIS, P. P. Orthotropic elastic constants of wood. *Wood Science and Technology*. 1972, roč. 6, č. 2, s. 138-156.
- [19] HOFFMAN, O. The Brittle Strength of Orthotropic Materials. *Journal of Composite Materials*. 1967, roč. 1967, č. 1, s. 200–206.
- [20] HOLMBERG, S., K. PERSSON a H. PETERSSON. Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials. *Computers*. 1999, roč. 72, 4–5, s. 459–480.
- [21] ISO 7892:1988. *Vertical building elements – Impact resistance tests – Impact bodies and general test procedures*. 1998.
- [22] JEMA SVITAVY a.s. *Dřevěná schodiště: Produktový katalog*. 2006. [cit. 2014–04–24].

- [23] Köhler's Medizinal-Pflanzen – Scientific species names: *Pinus silvestris* L. [online]. www.plant-pictures.de [cit. 2013–06–22]. Dostupné z: <http://pharm1.pharmazie.uni-greifswald.de/allgemei/koehler/koeh-lat.htm>
- [24] KOŽELUH, B. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5*. 1. vyd. Zlín: KODR, 1998, 1 svazek v různém stránkování. ISBN 80-238-2620-4.
- [25] KUKLÍK, P. Dřevo jako stavební materiál. *ProLignum: Přednášky ze seminářů proLignum* [online]. 2010, č. 1, s. 1–19 [cit. 2014–04–28].
- [26] *Lexikon dřeva*. In: ZEIDLER, Aleš. Fakulta lesnická a dřevařská [online]. 2012 [cit. 2013–06–23]. Dostupné z: http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/lexikon_dreva.pdf
- [27] MACEKOVÁ, V. a L. ŠMOLDAS. *Pozemní stavitelství II(S), M01. Schodiště a monolitické stěnové systémy*. Brno: FAST, VUT v Brně, 2006.
- [28] MARTIN, P. A. a J. R. BERGER. Waves in wood: free vibrations of a wooden pole. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2001, roč. 2001, č. 49, s. 1155–1178.
- [29] MASCIA, N. T. a F. A. R. LAHR. Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood. *Material Research*. 2006, roč. 9, č. 3, s. 301–310.
- [30] MATOVIČ, A. *Nauka o dřevě*. 2. nezměněné. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1981. ISBN 55-902-82.
- [31] Mechanické namáhání. *Wood.mendelu.cz: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, Ústav nauky o dřevě* [online]. 2013 [cit. 2013–06–25].
- [32] MOSES, D. M. a H. G. L. PRION. Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites. In: *Ansys.net* [online]. 2002 [cit. 2013–06–24].
- [33] NAIK, G. N. a A. V. K. MURTY. A failure mechanism-based approach for design of composite laminates. *Composite Structures*. 1999, roč. 1999, č. 45, s. 71–80.
- [34] NAIRN, J. A. *Numerical Modeling of Deformation and Fracture of Wood including Heterogeneity and Anisotropy*. COST Action E35 Meeting, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [35] O'HALLORAN, M. R. Changing nature of wood-based structural materials. *Construction and Building Materials*. 1992, roč. 6, č. 3, 139–143.
- [36] PĚNČÍK, J. a A. FLORIAN. Statistická analýza krátkých přímo uložených konzol ŽB sloupu jeřábové dráhy. In: *12. ANSYS Users Meeting pro Českou republiku a Slovensko 2004*. Brno: SVS FEM, 2004, s. 1–8.
- [37] PĚNČÍK, J. a M. LAVICKÝ. *Statické působení přímého třmenového schodiště: Prostorová analýza*. Brno: VUT v Brně, FAST, ÚSTM, 2006, 130 s.
- [38] Pevnost dřeva. *Wood.mendelu.cz: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, Ústav nauky o dřevě* [online]. 2013 [cit. 2013–06–25].
- [39] *Pinus sylvestris* (Scotch pine). *The Gymnosperm Database* [online]. 2006 [cit. 2013–06–23]. Dostupné z: http://www.conifers.org/pi/Pinus_sylvestris.php
- [40] POUSETTE, A. Testing and modeling of the behavior of wooden stairs and stair joints. *Journal of Wood Science*. 2006, roč. 52, č. 4, s. 358–362.
- [41] Poznáváme stromy: VSL. In: *Vojenské lesy a statky s. p.* [online]. 2011 [cit. 2013–06–23]. Dostupné z: <http://www.vls.cz/>
- [42] POŽGAJ, A., D. CHOVANEC, S. KURJATKO a M. BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dřeva*. 2 vyd. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [43] TSAI, S. W. a E. M. WU. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *Journal of Composite Materials*. 1971, roč. 1971, č. 5, s. 58–79.
- [44] VESELÝ, J. a L. MIKŠ. *Technické požadavky na výstavbu: Díl 6, Schodiště a rampy, Část 7, Díl 6, Kapitola 1*. Praha: Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2010, s. 1–22.
- [45] VINSON, J. R. a R. SIERAKOWSKI. *The behavior of structures composed of composite materials*. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, XIV, 435 s. ISBN 14-020-0904-6.

- [46] VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [47] XAVIER, J. *Identification de la variabilité des rigidités du bois à l'intérieur de l'arbre par la méthode des champs virtuels: application au P. Pinaster dans le plan LR*. Paris, 2007. Thèse pour obtenir la grade de Docteur. E.N.S.A.M (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers).
- [48] ZIENKIEWICZ, O, J ZHU a R TAYLOR. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2005, XIV, 733 s. ISBN 07-506-6320-0.

ABSTRACT

In most cases, staircases create a dominant construction of a whole object, emphasize its features and have an effect of an architecture element which contribute to a visual style and comfort of the object. Therefore, it is subtle, particularly light and airy staircases with attractive and modern design which are nowadays designed. An example of such elegant, airy staircases with impressive and modern style is a wooden prefabricated staircase with one-sided suspended stairs without staircase bolt on the bearing wall side. The aim of the habilitation thesis is to extend the description of its behaviour and, through changes, to improve its versatility and usability of this type of staircases and improve the variability of the construction system while saving material for production. In the dissertation, to reach the goals with the used approach Analysis – Description – Modification – Verification, methods of numeric modelling and experimental tests are combined. For the needs of numerical modelling, the approaches of wood modelling and its material behaviour with the failure prediction are described. Staircase details with higher loading, which are experimentally and numerically analysed and modified in detail, are identified with the use of numeric modelling. The verification of the designed changes and modifications is experimentally performed on two staircase prototypes in full scale. The modifications are integrated in the production programme and verified in practice.