

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 749*

*ISSN 1213-418X*

**Jan Pěňčík**

**APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ  
PRO NÁVRH VYBRANÝCH KONSTRUKCÍ  
POZEMNÍCH STAVEB**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
Ústav pozemního stavitelství

doc. Ing. Jan Pěňčík, Ph.D.

**APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ  
PRO NÁVRH VYBRANÝCH KONSTRUKCÍ  
POZEMNÍCH STAVEB**

APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES FOR DESIGNING  
SELECTED CIVIL BUILDING STRUCTURES

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU POZEMNÍ STAVBY



BRNO 2023

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

interiérové schodiště, materiálový model, FEA, experiment, dřevo, CFB, 3DCP

## **KEYWORDS**

interior staircase, material model, FEA, experiment, wood, CFB, 3DCP

© Jan Pěňčík, 2023

ISBN 978-80-214-6139-0

ISSN 1213-418X

# OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD.....	7
2 NOSNÉ KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB .....	7
2.1 Řešené téma.....	7
2.2 Přístupy pro návrh nosných konstrukcí schodišť .....	8
3 SCHODIŠTĚ.....	9
4 DŘEVĚNÁ SEGMENTOVÁ SCHODIŠTĚ.....	10
4.1 Přístupy geometrického modelování dřeva a jeho chování při zatížení.....	10
4.2 Materiálové vlastnosti .....	12
4.3 Numerické ověření materiálových vlastností.....	13
4.4 Zájmové typy dřevěných segmentových schodišť .....	15
4.4.1 <i>Segmentové schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice</i> <i>na straně nosné zdi – S1 .....</i>	<i>16</i>
4.4.2 <i>Segmentové schodiště se středovou schodnicí – S2.....</i>	<i>20</i>
4.4.3 <i>Segmentové vřetenové schodiště bez vnější schodnice – S3 .....</i>	<i>21</i>
5 SEGMENTOVÁ SCHODIŠTĚ Z CEMENTOVĚLÁKNITÝCH DESEK .....	22
5.1 Přístupy geometrického modelování CFB a jeho chování při zatížení .....	23
5.2 Materiálové vlastnosti .....	24
5.3 Schodnicové schodiště z CFB .....	26
6 SCHODIŠTĚ ZHOTOVENÁ ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ.....	29
7 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI.....	32
7.1 Výzkumná činnost.....	32
7.2 Pedagogická činnost.....	32
8 LITERATURA .....	33
9 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA .....	36
ABSTRACT.....	39

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: **doc. Ing. Jan Pěncík, Ph.D.**

Datum a místo narození: 23. květen 1973, Brno  
Adresa do zaměstnání: Ústav pozemního stavitelství  
Fakulta stavební VUT  
Veveří 331/95  
602 00 Brno, Česká republika  
Tel: 541 147 433  
E-mail: [pencik.j@vutbr.cz](mailto:pencik.j@vutbr.cz)  
Bydliště: Hlinky 972/34, 603 00 Brno



### Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

2014	doc.	VUT, Fakulta stavební, obor Pozemní stavby
2004		VUT, Centrum vzdělávání a poradenství, Doplnující pedagogické studium
2001	Ph.D.	VUT, Fakulta stavební, obor Teorie konstrukcí
1996	Ing.	VUT, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby
1988	maturita	Gymnázium Vídeňská, Brno, specializovaný obor stavebnictví

### Působení na VUT:

2022 – dosud	VUT, prorektor pro transfer znalostí
2018 – 2022	VUT, Fakulta stavební, proděkan pro vnitřní a zahraniční vztahy
2014 – dosud	VUT, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, zástupce vedoucího ústavu pro pedagogiku
2010 – dosud	VUT, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, odborný asistent (od roku 2010) / docent (od roku 2014)
2003 – dosud	VUT, Centrum výpočetních a informačních služeb, celoškolský software
2000 – 2010	VUT, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, asistent (do roku 2001) / odborný asistent (od roku 2001)
1999 – 2000	VUT, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, asistent

### Další odborná praxe a činnost:

2019 – dosud	Buildigo, s.r.o. (konzultant pro statiku a analýzy konstrukcí MKP, CFD)
2005 – 2021	znalec pro obor stavebnictví, odvětví stavby obytné, stavby průmyslové, stavební odvětví různá, se specializací statika, vady a poruchy pozemních a inženýrských staveb

### Ocenění a stipendijní programy:

- v roce 2015 10. místo v soutěži TOP 10 publikace v impaktovaných časopisech na FAST VUT
- v roce 2010 2. místo v technologické kategorii v soutěži TOP 10 Excellence VUT
- 1996 – Cena Josefa Hlávky – Nadace Nadání Josefa, Marie a Zdeňky Hlávkových
- 1995 – stipendium – Nadace Sir Franka Lampla

### Odborné zaměření:

analýzy (structural, mechanical, thermal, CDF) stavebních konstrukcí s využitím software ANSYS, navrhování nosných stavebních konstrukcí, experimentální zkoušení stavebních konstrukcí a detailů, vývoj konstrukcí pozemních staveb se zaměřením na interiérová schodiště z různých stavebních materiálů, optimalizace stavebních konstrukcí

### **Pedagogická činnost:**

#### **Garant předmětů:**

Pro kód studijního programu: B0732A260005 / B0732A260006 / B0732A260007: BHA001 Pozemní stavitelství 1, BHA010 Projekt – Pozemní stavitelství (S), BHB012 Bakalářský seminář (S-PST), BHB014 Specializovaný projekt (S-PST); BHA017 Projekt – Pozemní stavitelství. Pro kód programu: B3607 / B3656: BH009 Projekt – Pozemní stavitelství; BH013 Pozemní stavitelství 3 (E); BH006 Projekt – Pozemní stavitelství

#### **Vedení přednášek:**

Na Ústavu pozemního stavitelství (PST) (od 2010 – dosud):

BHA001 Pozemní stavitelství 1, BH003 Pozemní stavitelství 3 (S), BH008 Pozemní stavitelství 2 (M), BH012 Pozemní stavitelství 2 (K)

Na Ústavu stavební mechaniky (STM) (2000 – 2010):

0D1 Stavební mechanika I, 0D3 Statika stavebních konstrukcí 1, 0D4 Statika stavebních konstrukcí 2

#### **Individuální vedení studentů:**

vedení obhájených bakalářských prací – 89× na ústavech PST, STM a ARC

vedení obhájených diplomových prací – 35× na ústavech PST a STM

vedení obhájených disertačních prací – 2× na ústavu PST v oboru Pozemní stavby

aktuálně školitel studentů doktorského studia – 2× na ústavu PST v oboru Pozemní stavby

#### **Fakultní aktivity:**

Vědecká rada FAST (člen od 2018), Průmyslová rada (člen 2018 – 2022), Zahraniční komise (předseda 2018 – 2022), Ekonomická komise (člen 2018 – 2022), Knihovní rada (člen od 2022), Rada pro informační systém (člen od 2018), Ediční komise (člen od 2022), člen Rady BSP pro Architektura pozemních staveb, Městské inženýrství a Civil Engineering, Rada NSP pro Architektura a rozvoj sídel, Architektura a Prostorové plánování, Městské inženýrství, Stavební inženýrství – Pozemní stavby a Civil Engineering, člen Oborové rady DSP Pozemní stavby a Oborové rady DSP Building Construction

#### **Univerzitní aktivity:**

Vědecká rada VUT (člen od 2022), Ediční rada (předseda od 2022), Redakční rada časopisu Události na VUT (člen od 2022), Rada pro sport (člen od 2020), správa celoškolského software ANSYS, MSC Software, Autodesk, SolidWorks, Maple, Mathematica, Statistica a LabView (od 2003)

#### **Mimouniverzitní aktivity:**

Vědecká rada VETUNI (člen od 2022), výběrová komise OP TAK při MPO (člen od 2022)

#### **Řešené projekty:**

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

TH04020263 Výzkum a vývoj systému konstrukčních kompozitních desek na bázi cementu a organických vláken pro dřevostavby a občanskou výstavbu – spoluřešitel

TJ02000072 Vývoj technologie karbonizace povrchu dřevěných prvků staveb: eliminace vlhkostních a biodegradčních vlivů – člen řešitelského týmu

- FV40357 Výzkum a vývoj nového stavebního materiálu spočívajícího v kompozitní sendvičové desce pro vegetační vertikální konstrukce ve společnosti TOPWET – spoluřešitel
- FI-IM/227 Výzkum a vývoj vícevrstvého zdicího systému se zaměřením na tenčí stěnovou konstrukci při zvýšení tepelně izolačních vlastností a únosnosti stěn – člen řešitelského týmu

Spolupráce na projektech, výzkumných záměrech a výzkumných úkolech:  
 GAČR 103/09/2071, VVZ MSM 0021630511, VVZ MSM 0021630501, VVZ MSM 2161100007, OP VK CZ.1.07/2.400/12.0017, MPO ČR FB-CV/69/98, MPO ČR FI-IM/227, CEP ED3.2.00/08.0146, MPO ČR FI-IM2/053.

Spolupráce na projektech IG VUT (projekty Specifického výzkumu):  
 4× řešitel standardního projektu (197/2009, FAST-S-12-20, FAST-S-13-2085, FAST-S-17-4765)  
 10× spoluřešitel standardního projektu  
 11× spoluřešitel juniorského projektu

### Publikační činnost:

VaV výstupy podle AEK FAST od 1. 7. 2021:

$J_{imp} (D1)$	$J_{imp} (Q1)$	$J_{imp} (Q2)$	$J_{imp} (Q3)$
0	5	8	3
$J_{imp} (Q4)$	J	$J_{ost}$	D
1	4	33	21

- 11× příspěvek ve sborníku světového/evropského kongresu/sympózia/vědecké konference
- 69× příspěvek ve sborníku národního/mezinárodního kongresu/sympózia/vědecké konference
- 60× příspěvek ve sborníku odborné konference
- 1× učebnice (spoluautor)
- 3× vysokoškolská skripta (2× autor, 1× spoluautor)
- h-index k 7. 2. 2023: 4 (WoS) a 4 (Scopus)
- počet citací (bez autocitací) k 24. 1. 2022: 29 (WoS) a 16 (Scopus bez WoS)
- 0000-0002-2295-0088 (Orcid), AAD-6995-2019 (Researcher ID), 51061468700 (Scopus ID)

### Tvůrčí činnost a 3. role:

- spolupůvodce 4× EU patentů (1× EU patent *Reinforced console column and the method of its production (Zvýšení únosnosti jeřábových drah u železobetonových montovaných halových konstrukcí)* aplikován v Kovolitu Modřice, a.s., Sokolovské uhelné, a.s., Siemens Drásov, a.s., Cement Hranice, a.s. a Slévárně Heunisch, a.s., realizované řešení mělo vysoký ekonomický přínos v úspoře finančních prostředků na stavbu
- spolupůvodce 10× CZ patentů
- spolupůvodce 11× CZ užitných vzorů, 2× GER užitného vzoru a 2× CZ průmyslového vzoru
- znalecká činnost: 18× znalecké posudky jako OSVČ, 7× pod FAST VUT a 2× pod ÚSI VUT
- projekční činnost: FEA analýzy stavebních konstrukcí nebo jejich částí (spolupráce s SHP, a.s. na jejich projektech), např. 3D analýza: mostu přes rybník Čahoun (ČR), mostu na rychlostní silnici R52 (Slovensko), mostu přes řeku Rio Ebro (Španělsko), zavěšeného mostu přes řeku Odru a Antošovické jezero (ČR), mostu přes Lochkovské údolí (ČR), multifunkčních administrativních budov v areálu Spielberk Office Centre (ČR), posouzení mostu přes Masarykovo nádraží – SO 860 Železniční estakáda přes Masarykovo nádraží v Praze v km 3,993 a posudek projektu Trójského mostu : Statická a dynamická analýza.

# 1 ÚVOD

Obor *Pozemní stavby* je možné definovat jako široký a komplexní obor, který se podle ČKAIT zabývá problematikou navrhování staveb pro bydlení (obytné domy, domy pro individuální rekreaci), staveb občanských (sportovní stavby, stavby pro sociální a zdravotní péči, školské stavby, stavby pro kulturu, služby a obchod, stavby pro dočasné ubytování, stavby pro administrativu a stavby pro dopravu), staveb průmyslových (výrobní haly a výrobní budovy, skladovací objekty) a staveb zemědělských (sklady, stáje, skleníky).

Jedná se o obor, ve kterém se synergicky kombinují s teoretickým rozvojem inovativních postupů v navrhování nosných prvků a konstrukcí staveb, jejich technického vybavení a realizace s důrazem na využívání nových technických a technologických řešení při výstavbě, také znalosti jiných oborů a specializací, např. znalosti statiky a dynamiky stavebních konstrukcí, zkoušení stavebních materiálů, experimentálního ověřování únosnosti nosných prvků nebo konstrukčních detailů a diagnostiky staveb, geotechniky, geodézie atd. Cílem syntézy znalostí je návrh staveb splňující z provozního hlediska požadovaný účel. Proto pro návrh optimálního řešení je nutné využít i znalosti o kvalitě vnitřního prostředí s přesahem do oblasti stavebně fyzikálních dějů (tepelné a vlhkostní děje, stavební akustika, přirozené a umělé osvětlení budov) a provozně technického řešení. V neposlední řadě je návrh staveb ovlivněn architektonickým pohledem, a to jak ve smyslu návrhu vnitřního prostoru, tak i ve vazbě na vnější okolí stavby.

Vzhledem k aktuálnímu trendu návrhu staveb je kladen stále větší důraz na využití nových moderních environmentálních materiálů, materiálů z obnovitelných zdrojů při respektování principu cirkulární ekonomiky, snižování energetické náročnosti a plánování životního cyklu staveb.

S rozvojem informačních technologií, např. augmented reality (AR) a artificial intelligence (AI), a nástupem přístupu Stavebnictví 4.0 [57], tedy využíváním a rozvojem digitalizace, automatizace, robotizace a automatizace zprůmyslnění, se v rámci oboru Pozemní stavby začíná ve větší míře využívat přístupů využívající informačních modelů staveb (BIM), tj. správy dat o stavbě během celého jejího životního cyklu, optimalizace a numerického modelování [22]. Současně se rozvíjí nové technologie pro výrobu a výstavbu nosných prvků a konstrukcí staveb využívající aditivní technologie na různých materiálových bázích.

## 2 NOSNÉ KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB

Stavby, resp. stavební objekty, které vytvářejí samostatné ucelené celky, jsou tvořeny konstrukčními systémy. Jedná se o soubor vzájemně logicky prostorově provázaných nosných konstrukčních prvků, idealizovaně – plošných (desek, stěn, skořepin) a prutových (sloupů, pilířů, nosníků, trámů, průvlaků), které se podílí na přenosu účinku působícího zatížení a nepříznivých vlivů prostředí, kterým je stavba vystavena během výstavby a jejího užívání.

Uspořádání, spoje a vzájemné vazby nosných konstrukčních prvků stavby musí být navrženy tak, aby byl splněn požadavek §9 Vyhlášky č. 268/2009 Sb. na zajištění mechanické odolnosti a stability, který je definován jako stav, při kterém nedojde k náhlému nebo postupnému zřícení, popřípadě jinému destruktivnímu poškození kterékoliv její části, nebo nepřijatelnému přetvoření nebo kmitání, které může narušit mechanickou odolnost nebo stabilitu, nebo může ovlivnit její trvanlivost [58].

K popisu staveb je kromě dělení z hlediska konstrukčních systémů a nosných konstrukčních prvků možné přistoupit také z pohledu tzv. hlavních konstrukčních částí. Při tomto pohledu lze stavby rozdělit na (1) základové konstrukce, (2) svislé konstrukce, (3) vodorovné konstrukce, (4) schodiště a (5) střešní konstrukce.

### 2.1 ŘEŠENÉ TÉMA

Z uvedené široké oblasti zahrnující konstrukční části staveb se autor v rámci své odborné a výzkumné činnosti na FAST VUT zaměřil na problematiku *schodišť*. Přesněji na problematiku



návrhu nosných konstrukcí schodišť umístěných uvnitř stavby, tj. na *interiérová schodiště*, s využitím 3 materiálových bází. Jedná se o aktuální téma, jelikož schodiště jsou nezbytnou součástí všech patrových staveb v široké oblasti obytných, veřejných i průmyslových budov, a je také aktuální z pohledu využívání nových materiálů případně materiálů recyklovaných a nových moderních přístupů a technologií používaných při jejich výstavbě.

Tuto zvolenou problematiku autor dlouhodobě a průběžně řešil na Ústavu stavební mechaniky, FAST VUT a pokračuje v jejím řešení i na Ústavu pozemního stavitelství, FAST VUT, kde aktuálně působí. Téma nejprve autor řešil samostatně a posléze s pomocí týmu spolupracovníků pod jeho vedením. Do řešení tématu průběžně zapojuje studenty doktorského a navazujícího magisterského studia, u kterých byl nebo je školitelem, a kterými současně rozšiřuje řešitelský tým. V rámci řešené problematiky byla studenty doktorského studia, pro které byl autor školitelem, zpracovávána i přidružená témata související s rozvojem materiálové báze.

## 2.2 PŘÍSTUPY PRO NÁVRH NOSNÝCH KONSTRUKCÍ SCHODIŠŤ

Při návrhu nosných konstrukcí schodišť je nutné se primárně zabývat statickými požadavky tak, aby byly splněny požadavky mechanické odolnosti a stability definované v [58] bez ohledu na použitou materiálovou bázi. Nosná konstrukce schodiště musí být stabilní a musí přenášet veškerá stálá a nahodilá zatížení působící na schodiště během výstavby a její životnosti definovaná v ČSN EN 1991-1-1 (730035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1 [14].

Návrh nosné konstrukce schodiště vždy vychází ze způsobu podepření a materiálové báze, která je použita při návrhu nosných prvků konstrukce schodiště (Obr. 1). Prvotně je realizován návrh podle normových předpisů, a to často pomocí výpočtových programů založených na metodě konečných prvků [60], např. program ANSYS [2] nebo Abaqus [1], které jsou příkladem software umožňujícího řešení multifyzikálních úloh či za použití specializovaných programů pro posuzování nosných prvků nebo konstrukčních detailů, např. IDEA StatiCa [32].

Ve výpočtových programech jsou pro stanovení odezvy konstrukce na vnější působící zatížení a určení veličin potřebných k návrhu a následnému provedení posouzení dle normových předpisů vytvářeny výpočtové modely. Z důvodu, že se při jejich tvorbě často analyzovaná konstrukce geometricky idealizuje, stejně tak jako se idealizuje reálné připojení konstrukčních prvků nebo uložení konstrukce, tj. okrajové podmínky, idealizuje se materiálové chování pomocí základních materiálových modelů, ale dochází také k idealizaci působícího vnějšího zatížení, pak zjištěná odezva konstrukce neodpovídá odezvě reálné konstrukce.

Proto v případech vyšetřování mezní únosnosti konstrukce nebo při optimalizaci materiálového využití jednotlivých prvků konstrukce se zjednodušené výpočtové modely nahrazují zpřesněnými výpočtovými modely, které jsou geometricky neidealizované, používají typy konečných prvků umožňující modelovat konstrukci ve 3D, tj. prvky typu SOLID, SHELL, BEAM [2], zahrnují zpřesněný popis vzájemného připojení konstrukčních prvků zohledňující případně kontaktní připojení a používající v rámci analýz materiálové modely, které umožňují popis nelineárního chování materiálu až do jeho porušení nebo se využívají algoritmy, které umožňují predikovat porušení materiálu. Velmi často se pro snížení náročnosti na výpočtové zařízení a výpočtový čas používá metoda submodelingu [2], [3], [35]. Výpočtové modely lze dále zpřesňovat o uvažování vlivu počátečních imperfekcí, zahrnutí spolehlivostního přístupu nebo o uvažování vlivu historie zatížení. Analýzy mohou zahrnovat jak materiálovou, geometrickou, tak i konstrukční nelinearitu. Pro tvorbu zpřesněných výpočtových modelů autor používá v rámci řešené problematiky program ANSYS [2] a v případě materiálu s cementovou bází program ATENA [10].

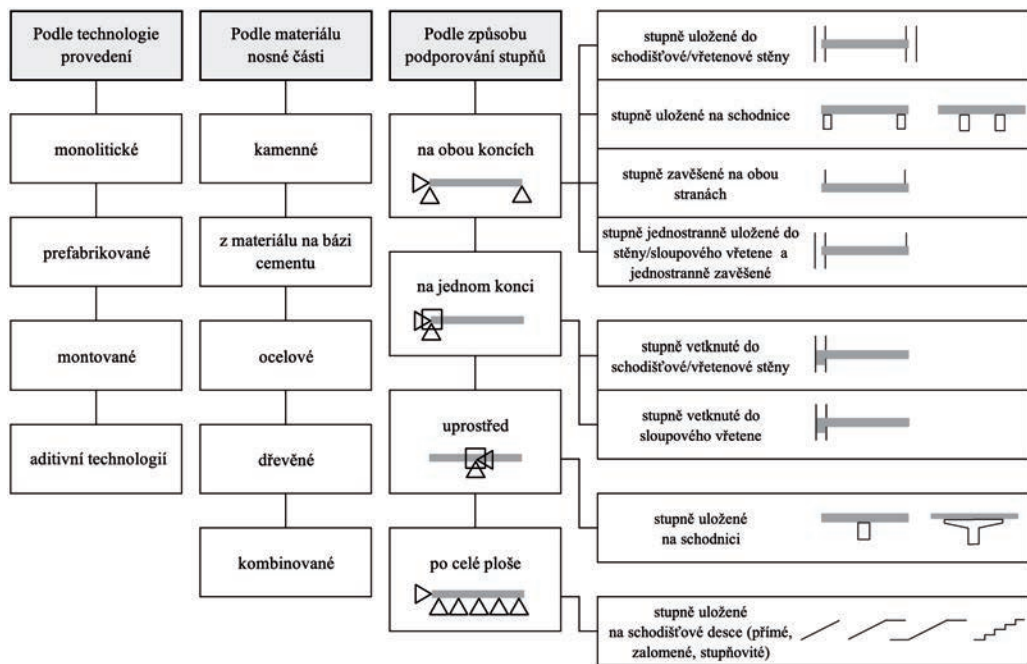
Pro získání odezvy konstrukce blízké se reálné odezvě v případě použití zpřesněných výpočtových modelů a numerických analýz je nutné pomocí experimentálních laboratorních zkoušek popsat materiálové chování a definovat materiálový model, tj. stanovit materiálové vlastnosti, případně vzájemné vazby mezi nimi s popisem kritérií porušení.

Při procesu návrhu nových typů nosných konstrukcí schodišť, změně klasických způsobů uložení, při myšlence využití nových materiálů pro návrh nosné konstrukce schodiště nebo jejich částí je vhodné a účelné rozšířit a doplnit teoretické ověření realizované numerickými analýzami o experimentální ověření v laboratorních podmínkách. Tento přístup je umožněn i normovými předpisy. Experimentální ověření pomocí zkušebních zatěžovacích zkoušek lze realizovat ve zmenšených měřítcích [55], které využívají principu modelové a materiálové podobnosti [6] nebo pomocí výsekových modelů v měřítku 1:1 nebo pomocí reálné konstrukce v měřítku 1:1, tzv. full-scale experiment. S ohledem na analýzu reálných rozměrů konstrukcí s uvažováním skutečných okrajových podmínek a použité materiálové báze lze full-scale experiment považovat za nejpřesnější metodu pro ověření chování konstrukce, jeho částí nebo materiálu. Ve výzkumu v oblasti stavebnictví se metoda ověření full-scale experimentem používá, což potvrzuje řada vědeckých publikací [23], [49], [50] nebo [61].

Vzájemná kombinace využívající numerické modelování s experimentálním zkoušením, resp. ověřením globálního chování konstrukce pomocí výsekových modelů v měřítku 1:1 nebo full-scale experimentů je autorem prezentována v dalším textu na zvolené problematice.

### 3 SCHODIŠTĚ

Schodiště lze definovat jako šikmou stupňovitou stavební konstrukci sloužící k trvalému překonávání výškového rozdílu chůzí. V případě interiérového schodiště, které je možné dělit podle různých kritérií např. podle (Obr. 1), je používáno ke komunikačnímu propojení podlaží stavby nebo k překonání různých výškových úrovní v rámci jednotlivých podlaží.



**Obr. 1:** Dělení schodišť podle vybraných kritérií – podle technologie provedení, podle materiálu nosné části a podle způsobu podporování schodišťových stupňů.

Ve většině případů, zejména v případě rodinných domů nebo administrativních staveb, tvoří schodiště dominantní konstrukci celé stavby a dotváří její ráz. Volba konstrukčního systému

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

Návrh schodišť z hlediska základních požadavků se provádí v souladu s obecně závaznými předpisy a normou ČSN 73 4130 (734130) Schodiště a šikmé rampy – Základní požadavky [13]. Navržené rozměry schodišťového prostoru a schodiště, tj. rozměry stupňů vyplývající z rovnice schodiště  $2h + b = 630$  mm, kde  $h$  je výška a  $b$  je šířka schodišťového stupně, šířkové uspořádání schodišťového ramene  $B$ , sklon schodišťového ramene  $\alpha$  a tvar stupňů vychází z normy ČSN 73 4130 dle typu stavby s ohledem na funkčnost, použitelnost a bezpečnost při používání. Navržené rozměry schodiště by měly být navrženy tak, aby byly pro uživatele pohodlné a měly by zajišťovat poměrnost, neměnný rytmus chůze a její harmoničnost, jak vyplývá z [13].

Na (Obr. 1) je uvedeno, že jedním z možných kritérií dělení schodišť je dělení podle materiálu nosné části. V rámci moderní výstavby se nejčastěji používají monolitická železobetonová schodiště (materiál na bázi cementu). Avšak s ohledem na urychlení rychlosti a odstranění mokrého procesu výstavby in-situ jsou v současnosti velmi upřednostňována prefabrikovaná nebo montovaná schodiště z betonu, oceli, dřeva nebo v kombinaci uvedených materiálů nebo nově vyvinutých materiálů.

Na montovaná schodiště lze pohlížet jako na schodiště segmentová, pro která platí předpis Evropské organizace pro technické posuzování (EOTA) EAD 340006-00-0506 Prefabricated Stair Kits [21]. Tato schodiště jsou vyráběna po částech, tj. segmentech, které jsou následně v objektu vzájemně při jejich instalaci spojovány konstrukčními spoji. V případě segmentových schodišť se autor zaměřil v rámci odborné a výzkumné činnosti na schodiště dřevěná z borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (kapitola 4) a schodiště z cementovláknitých desek (kapitola 5).

Velmi aktuálním tématem, které zapadá v současné době do přístupu Stavebnictví 4.0 využívající digitalizaci, automatizaci, robotizaci a rozvoj nových stavebních materiálů je využití aditivní technologie pro výstavbu nosné konstrukce schodišť. Jedná se o nové téma, které se nachází na začátku svého rozvoje, a to s ohledem na rozvoj technologií použitelných pro aditivní technologii 3D tisku, způsobů vyztužování, rozvoje používaných materiálů na bázi cementu pro aditivní technologii. Využitím tohoto přístupu pro nosné konstrukce schodišť se zabývá kapitola 6.

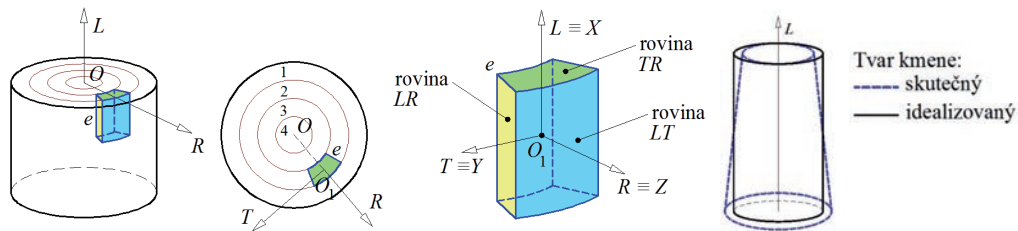
## 4 DŘEVĚNÁ SEGMENTOVÁ SCHODIŠTĚ

### 4.1 PŘÍSTUPY GEOMETRICKÉHO MODELOVÁNÍ DŘEVA A JEHO CHOVÁNÍ PŘI ZATÍŽENÍ

Při analýzách dřevěných nosných konstrukcí nebo detailů pomocí metody konečných prvků, např. s pomocí programu ANSYS, lze v závislosti na typu a účelu prováděné analýzy použít několik možných přístupů geometrického modelování dřeva. Při vytváření výpočtových modelů se přijímají předpoklady a zjednodušení přírodního materiálu, např. v případě modelování letokruhů, kdy lze pro zjednodušení uvažovat jejich neměnný tvar, tloušťku a křivost po délce kmene, i když mají spirálovitý průběh. Další idealizací je zanedbání vlivu jarního a letního dřeva, která mají rozdílné materiálové vlastnosti [9], kdy se dřevo se uvažuje jako homogenní materiál. Při detailních analýzách je možné tento rozdíl mezi jarním a letním dřevem uvažovat podle [31] a [47].

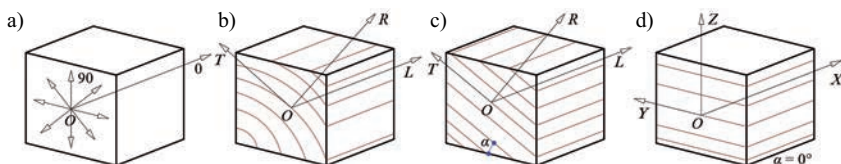
Vlivem nestejněměrné, komplexní struktury a nehomogenity dřeva, různých mechanických vlastností jarního a letního dřeva letokruhů, malé deformaci dřevových paprsků v příčném směru lze dřevo považovat za anizotropní materiál [20], [41] a [42]. V případě globálního pohledu z úrovně kmene se však nevyskytuje obecný stav anizotropie, u kterého neexistují roviny symetrie materiálu a materiálové a pevnostní vlastnosti jsou v libovolných směrech odlišné.

V případě dřeva existují podle [42] tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálu –  $LT$ ,  $LR$  a  $TR$  [4], [7], [46], kde  $L$  je podélný,  $T$  tangenciální a  $R$  radiální směr válcové soustavy souřadnic  $LTR$  (Obr. 2), ve kterých má dřevo nezávislé materiálové a pevnostní vlastnosti [4]. Plochy  $LR$  a  $TR$  jsou rovinné, ale plocha  $LT$  je válcová, a to při idealizaci kuželovitěho tvaru kmene válcem (Obr. 2) a (Obr. 3). Dřevo lze tak označit za materiál válcově ortogonálně anizotropní. Válcovou soustavu souřadnic  $LTR$  lze při idealizaci zakřivení letokruhů jejich linearizací nahradit kartézskou soustavou souřadnic  $XYZ$  a chování dřeva tak popsat ortogonálně anizotropním materiálovým modelem (Obr. 3). Chyba idealizace je úměrná vzdálenosti letokruhů od středu kmene, s tím, že chyba je menší čím dále jsou letokruhy od středu kmene.



**Obr. 2:** Válcová soustava souřadnic na úrovni kmene  $LTR$  a na úrovni obecného elementu  $e$  s naznačením idealizace kuželovitěho tvaru kmene válcem.

Idealizace zakřivení letokruhů vychází také ze způsobu výroby schodišť, kdy se s ohledem na větší tvarovou stálost a eliminaci kroucení používají při výrobě jednovrstvé desky z rostlého dřeva, které vzniknou lepením dílčích lamel. Tímto technologickým postupem výroby je jednoznačně definován pouze podélný směr  $L$ , který je totožný s podélnou orientací vláken spárovky. Směry  $R$  a  $T$  není možné z důvodu různé orientace lamel stanovit. V případech, kdy nelze určit směry  $R$  a  $T$ , lze při analýzách použít i ortotropní materiálový model, který předpokládá ve směru  $R$  a  $T$  stejné vlastnosti [51]. Vzhledem k rozměrům prvků je možné materiálové vlastnosti určené pro válcovou soustavu  $LTR$  použít i pro soustavu kartézskou  $XYZ$ , přičemž ve směru  $Y$  a  $Z$  se ekvivalentně podle [51] uvažují stejné vlastnosti.



**Obr. 3:** Materiálový model: příčně izotropní pro použití při analýze podle ČSN EN 338 (73 1711) [16] a EN 1995-1-1 (73 1701) [15] (a), s válcovou soustavou souřadnic  $LTR$  (b) a kartézskou soustavou souřadnic  $LTR$  (c) resp.  $XYZ$  (d).

Při popisu chování materiálu je nutné predikovat jeho porušení. Pro popis porušení lze použít neinteraktivní kritéria, která však nezohledňují vzájemnou vazbu mezi normálovými složkami napětí a ani mezi složkami normálových a smykových napětí nebo interaktivní kritéria, která komplexně zohledňují vzájemné vazby mezi normálovými složkami napětí a mezi složkami normálových a smykových napětí, [5]. V rámci řešeného tématu bylo při analýzách použito interaktivní Hoffmanovo [30] a Tsai-Wu kritérium [56] v kombinaci s ortotropním materiálovým modelem a neinteraktivní kritérium  $\sigma_{\max}$  pro predikci porušení materiálu v tahu s anizotropně plastickým materiálovým modelem.

Kritérium  $\sigma_{\max}$  lze zapsat pro soustavu souřadnic  $LTR$ , resp. identicky pro soustavu souřadnic  $XYZ$ , pomocí pevnostních podmínek ve tvaru

$$f_{ic} < \sigma_i < f_{it} \text{ pro } i = L, T, R, \quad |f_{ij}| < \sigma_{ij} \text{ pro } ij = LT, TR, LR. \quad (1)$$

Interaktivní Hoffmanovo a Tsai-Wu kritérium porušení lze pro prostorový stav napjatosti zapsat pomocí tenzorů ve tvaru polynomu, který popisuje plochu porušení jako funkci materiálových pevností  $F_i$  a  $F_{ij}$  při zanedbání členu  $F_{ijk}$  podle [56] ve tvaru

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \geq 1, \text{ pro } i, j, k = 1 \dots 6 \text{ (3D)}. \quad (2)$$

V případě ortotropního materiálového modelu je možné zanedbat členy mimo hlavní diagonálu [56], tj. členy  $F_4, F_5$  a  $F_6$  a porušení tak popsát pomocí složek vektoru napětí  $\{\sigma\}$  ve tvaru

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 + \\ + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 \geq 1, \quad (3)$$

kde pro souřadnicovou soustavu  $LTR$  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 [30] a [56].

## 4.2 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

Dřevo jako přírodní materiál se vyznačuje značnou variabilitou materiálových vlastností [4] a [51]. Rozptyl vlastností je způsoben obecnou strukturou dřeva, které je směrově orientováno v závislosti na působícím zatížení a jeho směru, na vlhkosti, teplotě prostředí atp. Moduly pružnosti a pevnosti mají výrazný rozptyl, a to jak po šířce průřezu kmene, tak i po jeho délce. Průměrné hodnoty variačních koeficientů podle [4] pro 12% vlhkost dřeva jsou uvedeny v (Tab. 1).

**Tab. 1:** Průměrné variační koeficienty ( $VK$ ) podle [4].

	$VK$		$VK$
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 %

Materiálové vlastnosti borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) popisující ortotropní materiálový model byly určeny pomocí [4], [26] a [51] a jsou uvedeny v (Tab. 2). Vlastnosti splňují podmínky (4) a (5), které vyjadřují jejich vzájemný vztah podle [59].

$$E_L > E_R > G_{LR} \approx G_{LT} > E_T > G_{RT} \quad (4)$$

$$E_L \gg E_R > E_T, \quad G_{LR} > G_{LT} \gg G_{RT}, \quad \nu_{LR} > \nu_{LT} > \nu_{RT} \quad (5)$$

**Tab. 2:** Materiálové vlastnosti borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.).

$E_L$	$E_T$	$E_R$	$G_{RT}$	$G_{LT}$	$G_{LR}$	$\nu_{RT}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$	$E_b$
14300	545	700	500	800	1230	0,38	0,04	0,03	12800
$f_{Lt}(t-tah)$	$f_{Lc}(c-tlak)$	$f_{Tt}$	$f_{Tc}$	$f_{Rt}$	$f_{Rc}$	$f_{LR}$	$f_{LT}$	$f_{RT}$	$R_b$
103,0	48,5	3,5	7,6	5,4	5,2	7,5	7,3	2,3	86,0

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

Pro využití materiálových vlastností z (Tab. 2) s anizotropním plastickým materiálovým modelem (ANISO) obsaženým v materiálové knihovně programu ANSYS a definovaným 27 materiálovými vlastnostmi bylo nutné přistoupit k jejich úpravě tak, aby byla podle [45] splněna

podmínka plastické nestlačitelnosti (6) a podmínka (7), kterými je zajištěna uzavřená plocha plasticity eliptického tvaru. Upravené materiálové vlastnosti jsou uvedeny v (Tab. 3).

$$\frac{f_{yLt} - f_{yLc}}{f_{yLt} f_{yLc}} + \frac{f_{yTt} - f_{yTc}}{f_{yTt} f_{yTc}} + \frac{f_{yRt} - f_{yRc}}{f_{yRt} f_{yRc}} = 0 \quad (6)$$

$$M_{11}^2 + M_{22}^2 + M_{33}^2 - 2(M_{11}M_{22} + M_{22}M_{33} + M_{11}M_{33}) < 0, \quad M_{ii} = \frac{f_{yLt} f_{yLc}}{f_{yit} f_{yic}} \text{ pro } i = L, T, R \quad (7)$$

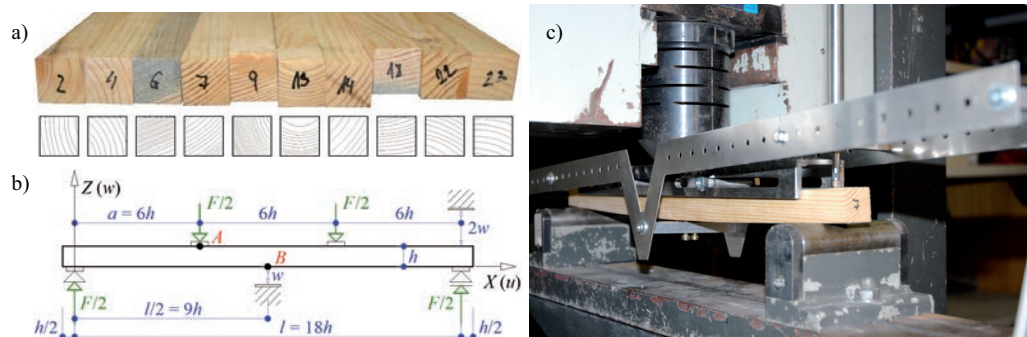
**Tab. 3:** Materiálové vlastnosti upravené pro anizotropně plastický materiálový model.

$f_{Lt}$	$f_{Lc}$	$f_{Tt}$	$f_{Tc}$	$f_{Rt}$	$f_{Rc}$	$f_{LR}$	$f_{LT}$	$f_{RT}$
101,0	43,0	4,92	5,4	5,4	5,2	7,5	7,3	2,3

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

Ověření materiálových vlastností uvedených v (Tab. 2) a (Tab. 3) bylo provedeno kombinací metody experimentálního zkoušení, statistického vyhodnocení a numerického modelování.

V rámci experimentálních zkoušek byla zkoušena podle ČSN EN 384 [17] a ČSN EN 408 [18] zkušební tělesa o rozměrech  $25 \times 25 \times 475$  mm na čtyřbodový ohyb (Obr. 4). Zkouškami byla stanovena dráha zatížení a průměrná hodnota pevnosti v ohybu  $R_b$  resp. modulu pružnosti v ohybu  $E_b$  ( $R_b = 75,9$  MPa resp.  $E_b = 12935,4$  MPa).



**Obr. 4:** Pohled na sadu dřevěných zkušebních těles (a), uspořádání zatěžovací zkoušky na čtyřbodový ohyb (b) a zkoušení vzorku č. 7 s vyvinutým „V“ přípravkem (c).

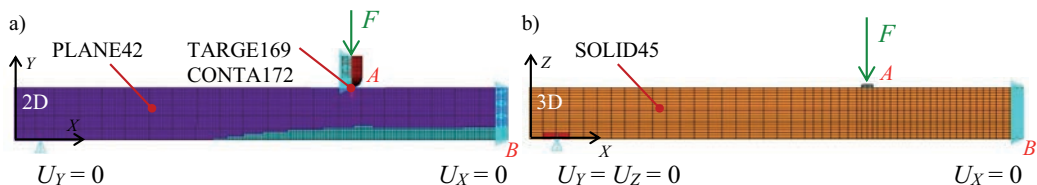
S ohledem na rozdíl experimentálně zjištěných hodnot a hodnot podle (Tab. 2) bylo provedeno ověření statistickým vyhodnocením, při kterém bylo porovnáváno, zdali je experimentálně stanovený průměr modulu pružnosti v ohybu  $E_b$  v rozporu s hodnotou podle (Tab. 2). Testováním provedeným jednovýběrovým  $t$ -testem s předpokladem normality posouzeným Shapiro-Wilksovým testem bylo prokázáno, že experimentálně stanovený průměr  $E_b$  není v rozporu s hodnotou podle (Tab. 2). Tak byla prokázána možnost použití  $E_b$ , resp. dalších materiálových vlastností uvedených pro definici materiálových modelů a kritérií porušení.

### 4.3 NUMERICKÉ OVĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Přístupy modelování, materiálové modely a materiálové vlastnosti definované v (Tab. 2) a (Tab. 3) byly ověřeny numerickým modelováním pomocí spolehlivostní a deterministické analýzy.

Spolehlivostní analýza byla provedena pomocí parametrického 2D výpočtového modelu zkušebních těles (Obr. 5) v kombinaci s naprogramovaným uživatelským materiálovým modelem –

modifikovaným bilineárním materiálovým modelem bez zpevnění v tlaku a s křehkým lomem v tahu modelovaný pomocí kritéria maximálního napětí.



**Obr. 5:** Výpočtový model použitý při spolehlivostní (a) a deterministické (b) analýze.

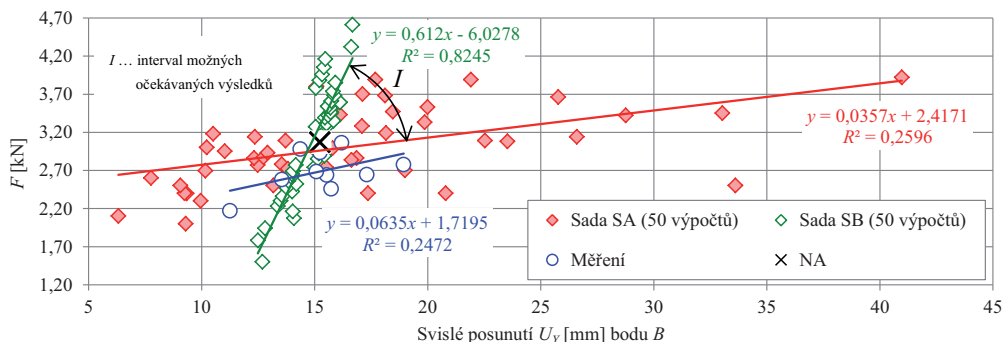
Při analýze byla respektována skutečnost, že zvolené vstupní veličiny ( $E_L, f_{L1}, f_{Lc}$ ) jsou obecně zatíženy nejistotami [25]. Možná náhodná proměnlivost vstupních veličin (Tab. 4) byla stanovena podle [4], viz (Tab. 1). Pro všechny veličiny bylo uvažováno normální rozdělení pravděpodobnosti (RP). Geometrie výpočtového modelu byla uvažována jako neměnná.

**Tab. 4:** 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
$f_{L1}$	103,0	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 [24]. Pomocí statistických parametrů vstupních veličin (Tab. 4) byly vytvořeny dvě sady dat (SA) s předpokládanou vzájemnou statistickou nezávislostí vstupních veličin a (SB) s předpokládanou vzájemnou statistickou závislostí vstupních veličin s koeficientem korelace 1,0.



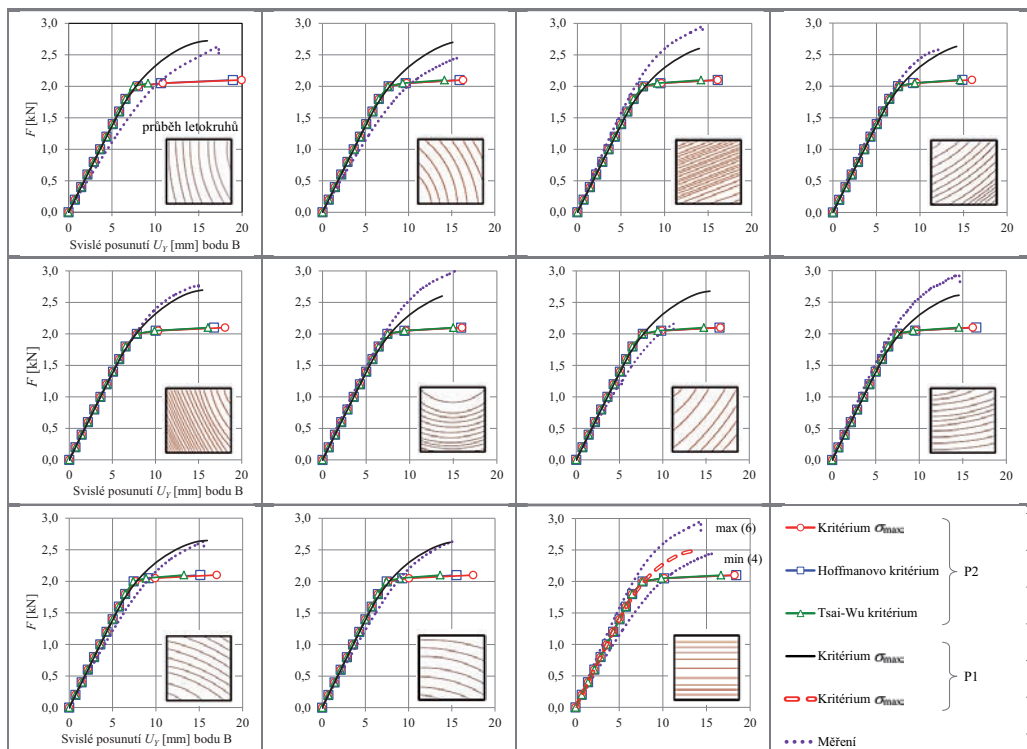
**Obr. 6:** Graf závislosti síly na mezi únosnosti  $F$  na svislém posunutí  $U_Y$ .

Pomocí sad SA a SB (Obr. 6) byl určen interval  $I$  možných očekávaných výsledků testů. Při porovnání s výsledky experimentálních testů zkušebních těles bylo možné konstatovat, že spolehlivostní analýza potvrdila závěr týkající se možnosti použití materiálových vlastností podle (Tab. 2).

Deterministická analýza byla provedena pomocí prostorových 3D výpočtových modelů zkušebních těles (Obr. 5). Geometrie výpočtových modelů respektovala průběh letokruhů, a byla vytvořena pomocí jednoho z čelních pohledů na zkušební tělesa (Obr. 4). Při přijetí této idealizace se vycházelo z předpokladu, že kmen obecně kuželovitého tvaru lze idealizovat válcovým tělesem,



a že letokruhy mají po délce zkušebního tělesa neměnnou křivost. Při výpočtech byly uvažovány pro porovnání a vyslovení závěrů pro rozvoj způsobů modelování a analyzování chování nosných konstrukcí dřevěných segmentových schodišť nebo jejich dílčích prvků dva přístupy v modelování chování materiálu – (P1) anizotropně plastický materiálový model s neinteraktivním kritériem  $\sigma_{\max}$  pro predikci porušení materiálu a (P2) ortotropní materiálový modelem v kombinaci s Hoffmanovým a Tsai-Wu kritériem pro predikci porušení materiálu. Výpočty stejně jako v případě spolehlivostní analýzy respektovaly vliv velkých posunů a rotací konečných prvků, tj. geometrickou nelinearitu.



Obr. 7: Pracovní diagramy ( $F - U_\gamma$ ).

Zhodnocením výsledků zobrazených na (Obr. 7) bylo možné vyslovit závěr, který byl následně aplikován při analýzách všech typů dřevěných segmentových schodišť, a lze jej zobecnit do tvaru, že v případech, ve kterých je úroveň působícího zatížení pod úrovní, při které dochází k porušení materiálu dřeva, je možné vliv letokruhů zanedbat a 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 s Tsai-Wu a Hoffmanovým kritériem porušení anizotropně plastický materiálový model s uvažováním vlivu letokruhů a kritériem porušení  $\sigma_{\max}$ . Při zanedbání vlivu letokruhů a použití anizotropně plastického materiálového modelu lze očekávat nižší hodnoty sledovaných veličin.

#### 4.4 ZÁJMOVÉ TYPY DŘEVĚNÝCH SEGMENTOVÝCH SCHODIŠŤ

Získané znalosti o modelování chování dřeva pomocí numerických analýz a pomocí programu ANSYS s použitím různých materiálových modelů doplněných o kritéria porušení společně

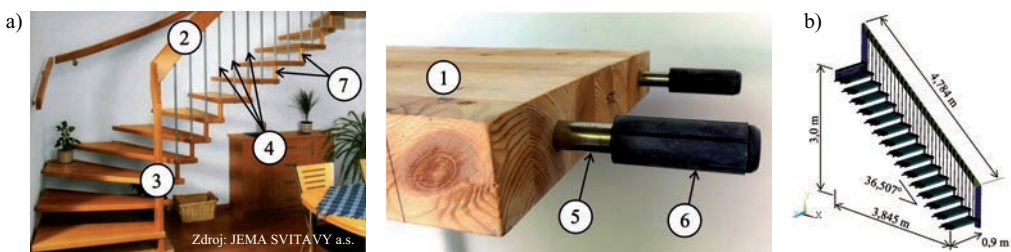


s praktickými znalostmi experimentálního testování nosných konstrukcí nebo jejich detailů byly využity při řešení tématu (S1) segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi, (S2) segmentového schodnicového schodiště se středovou zalomenou schodnicí a (S3) segmentového vřetenového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez vnější schodnice. Závěry numerických analýz a experimentálních testů případů (S1) až (S3) byly použity při konstrukčních úpravách schodišť s cílem zvýšení univerzálnosti a použitelnosti a zlepšení variability konstrukčního systému se současným snížením nákladů úsporou materiálu na výrobu.

V rámci řešení témat (S1) až (S3) byla kombinována metoda numerického modelování a experimentálního zkoušení, kdy pomocí numerického modelování byly zjištěny detaily 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 prototypech schodišť nebo na výsekových prototypech schodišť v měřítku 1:1.

#### 4.4.1 SEGMENTOVÉ SCHODIŠTĚ S JEDNOSTRANNĚ ZAVĚŠENÝMI STUPNI BEZ SCHODNICE NA STRANĚ NOSNÉ ZDI – S1

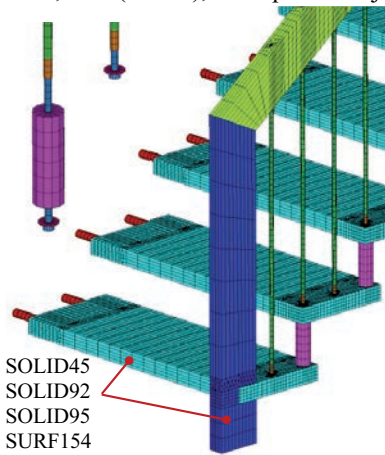
Schodiště (Obr. 8) je tvořeno dřevěnými stupnicemi (1), masivním madlem (2), sloupky u nástupního (3) a výstupního stupně, popř. vnitřními sloupky v případě půdorysného zalomení schodiště, soustavou ocelových táhel (4), prvky pro uložení stupňů do nosné zdi (5) a (6) a distančními prvky (7), které vymezují výškovou polohu stupnic.



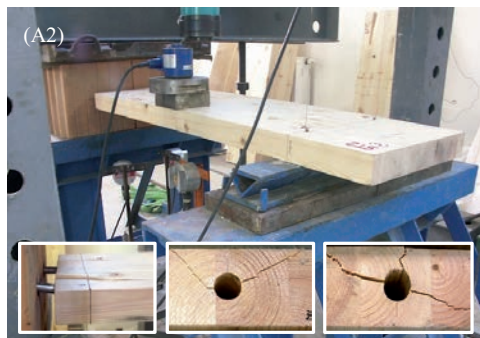
**Obr. 8:** Prvky segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi (a) a geometrie výpočtového modelu (b).

Pro identifikaci kritických detailů schodiště bylo zvoleno přímé schodiště s konstrukční výškou 3,0 m (nejčastější případ v případě rodinných domů) a sklonem  $36,507^\circ$  (Obr. 8), které představuje ze statického hlediska nejneprůzračnější případ uspořádání. Stupnice tl. 0,05 m analyzovaného schodiště (15 + 1 ks) byly na straně nosné zdi uloženy pomocí soustavy ocelových trnů  $\varnothing 16$  mm a pryžových pouzder (Obr. 8) a na vnější straně byly stupně zavěšeny pomocí soustavy ocelových táhel  $\varnothing 12 / 2$  mm (24 ks) do masivního madla  $0,140 \times 0,050$  m, které vynáší na vnější straně celé schodiště.

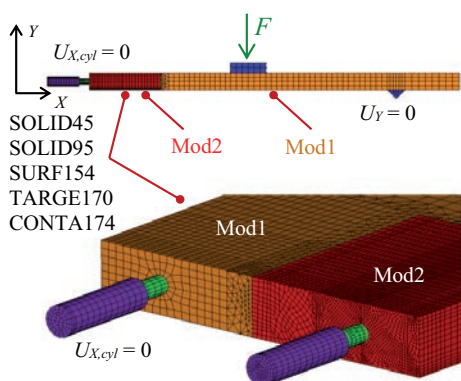
Kritická místa byla zjištěna s využitím výpočtového programu ANSYS a 3D výpočtového modelu (Obr. 9), který byl sestaven podle závěrů dle kapitoly 4.3. Chování dřeva bylo popsáno ortotropním materiálovým modelem se zanedbáním průběhu letokruhů (Obr. 3). K predikci porušení pro identifikaci míst se zvýšeným namáháním bylo použito v kombinaci se zvoleným materiálovým modelem Tsai-Wu a Hoffmanovo kritérium porušení. Zatížení bylo aplikováno v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14]. Numericky



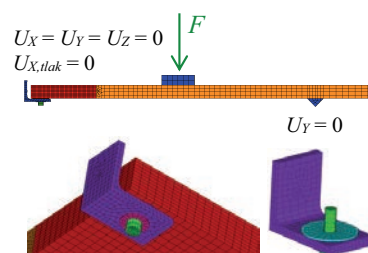
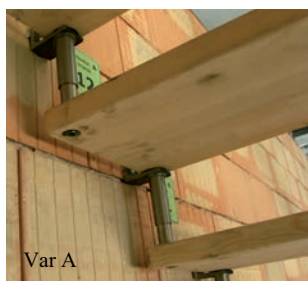
**Obr. 9:** Výpočtový model.



Obr. 10: Výsekové experimentální modely.



Obr. 11: Výsekové experimentální modely.



Obr. 12: Upravené připevnění stupnic do nosné zdi – Var A, Var B s výpočtovým modelem.

bylo zjištěno, že k největšímu namáhání dochází v místě (A1) vzájemného spojení stupňů pomocí distančních prvků, (A2) uložení stupně do nosné zdi a (A3) připojení ocelového táhla do nosného madla. Místa s koncentrací namáhání byla experimentálně zkoušena (Obr. 10) a bylo potvrzeno, že místem s nejnižší únosností je detail (A2), kdy průměrná síla nutná k porušení dosahovala hodnoty 7,003 kN oproti síle 33,118 kN (A1) a 14,205 kN (A3).

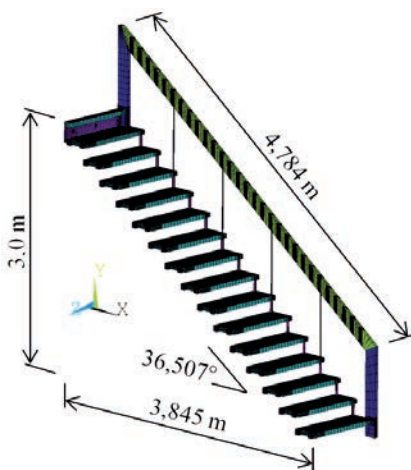
Prvním krokem procesu modifikace tohoto kritického detailu byla jeho detailní numerická analýza provedená pomocí 3D výpočtového modelu (Obr. 11), která současně sloužila k verifikaci přístupu modelování a odvození materiálových vlastností podle (Tab. 2) a (Tab. 3). V části stupnice, kde nedocházelo při experimentu k porušení byl použit ortotropní materiálový model se zanedbáním průběhu letokruhů, ozn. Mod1 na (Obr. 11). K predikci porušení pro identifikaci míst se zvýšeným namáháním bylo použito v kombinaci se zvoleným materiálovým modelem Tsai-Wu a Hoffmanovo kritérium porušení. V části, kde docházelo při experimentálních zkouškách k porušení (Obr. 10) byl uvažován anizotropní plastický materiálový model s predikcí porušení dřeva pomocí kritéria  $\sigma_{max}$ , ozn. Mod2 na (Obr. 11).

Porovnáním výsledků experimentálních zkoušek místa uložení stupně do nosné zdi (A2) byla zjištěna velmi dobrá shoda s numerickou analýzou. Průměrná hodnota síly  $F$  zjištěná experimentálně byla 7,003 kN a numericky 7,439 kN, tj. rozdíl 6,2 %. V případě svislého posunutí pod působícím zatížením byla průměrná hodnota  $U_Y$  zjištěná experimentálně 5,904 mm a numericky 5,115 mm, tj. rozdíl 12,6 %.

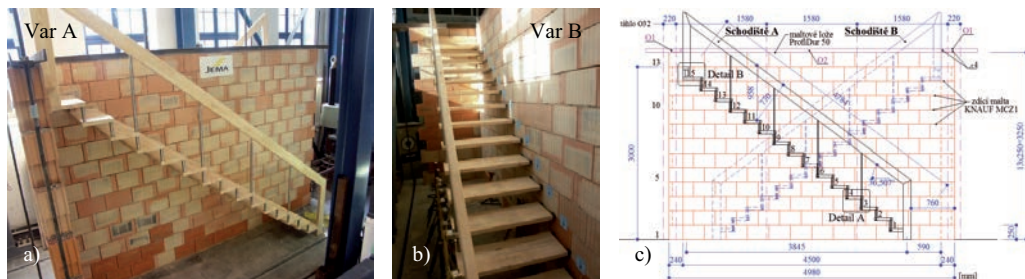
Následným krokem byla úprava segmentového schodiště s cílem rozvoje univerzálnosti, použitelnosti a zlepšení variability konstrukčního systému se snahou minimalizace nákladů na výrobu

schodiště úsporou materiálu a zjednodušením montáže. Na základě vyhodnocení globální numerické analýzy přímého schodiště s konstrukční výškou 3,0 m (Obr. 8), experimentálních testů míst se zvýšeným namáháním (A1) až (A3) a ověřovacích detailních numerických analýz byla navržena (i) změna způsobu připevnění stupnic do nosné zdi ve dvou variantách (Var A, Var B) na (Obr. 12), díky které bylo možné přistoupit i (ii) k návrhu redukce počtu ocelových táhel z 24 ks na 4 kusy na celé schodiště (Obr. 13) a (iii) ke změně tloušťka stupnic z tloušťky 0,05 m na 0,04 m. Při modifikovaném uložení stupnic do nosné zdi bylo využito spodního připevnění stupnic pomocí válcovaného profilu L  $80 \times 60 \times 8$  mm délky 0,5 m s využitím závrtné matice ve stupnici. K eliminaci kročejového hluku bylo gumové pouzdro nahrazeno pryžovou podložkou. Systém připevnění je zobrazen na (Obr. 12).

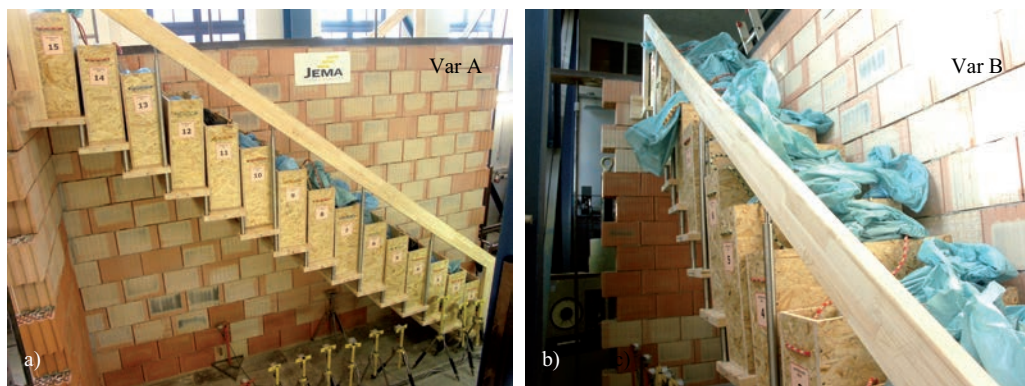
Navržené úpravy uložení byly staticky analyzovány pomocí 3D výpočtového modelu (Obr. 12). Po ověření vhodnosti návrhu byla provedena globální statická analýza schodiště s uvažováním ortotropního materiálového modelu a Hoffmanova a Tsai-Wu kritéria porušení. Pro ověření byla také provedena dynamická (modální) analýza pomocí blokové Lanczosovy metody iterace. Úpravami konstrukce segmentového schodiště došlo k mírnému snížení hodnoty první vlastní frekvence z 8,35 Hz na 7,40 Hz, ale obě hodnoty jsou vyšší než hodnota 5,0 Hz uvedená v EAD 340006-00-0506 [21].



Obr. 13: Geometrie výpočtového modelu.



Obr. 14: Funkční vzorky segmentového schodiště (a), (b) a geometrie zkušebního stendu (c).

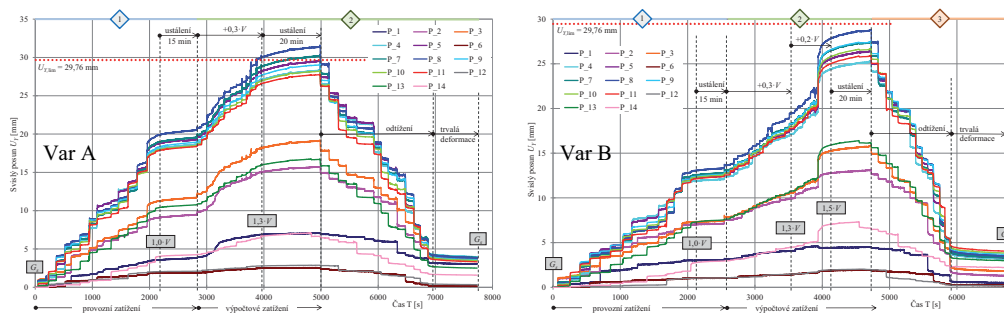


Obr. 15: Funkční vzorky schodiště Var A (a) a Var B (b) při zatěžovací zkoušce.



K prokázání globální únosnosti konstrukce segmentového schodiště s navrženými změnami bylo přistoupeno pomocí statické zatěžovací zkoušky na 2 funkčních vzorcích segmentových schodišť (Obr. 14) v měřítku 1:1, které byly sestaveny v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, FAST VUT. Při zkouškách se použila metodika EAD 340006-00-0506 [21], ČSN 73 2030 [11] a ČSN 73 2031 [12].

Konstrukce segmentových schodišť byla zatěžována v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14] tak, aby byla zatěžovacími zkouškami prokázána funkčnost z hlediska mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti. Na stupnici bylo umístěno spojitě rovnoměrného zatížení  $V$ , které bylo ve 2 krocích zvýšeno o 20 % a 30 % (Obr. 16). V extrémním případě na schodiště působilo kromě vlastní tíhy  $G_0$  zatížení  $1,5 \times V$ , tj. při přepočtu hmotnost 1910 kg.



**Obr. 16:** Záznam svislého posunutí měřících bodů v průběhu statické zatěžovací zkoušky.

Vyhodnocení statických zatěžovacích zkoušek bylo provedeno podle EAD 340006-00-0506 [21], které připouští stanovení únosnosti pomocí mezních stavů, ale i využití experimentálních zkoušek a umožňuje zatěžovat schodiště pouze do dosažení dostatečné úrovně zatížení před porušením, tedy není nutné zatěžovat až do porušení. U obou variant schodišť byl průhyb při provozním zatížení na straně nosného madla ve vztahu ke středové čáře ramene nižší než mezní hodnota (Tab. 5).

**Tab. 5:** Maximální svislé posunutí  $U_Y$  [mm] a posouzení podle EAD 340006-00-0506 [21].

Schodiště	Zatížení	max $U_Y$ [mm]	$U_{Y,lim} = L_s / (200 \cdot \cos \alpha)$ [mm]	Podmínka
Var A	$1,0 \times V$	20,66	29,76	max $U_Y < U_{Y,lim}$
Var B	$1,0 \times V$	13,48	29,76	max $U_Y < U_{Y,lim}$

Statické zatěžovací zkoušky schodišť lze podle ČSN 73 2030 [11] charakterizovat jako zkoušky bez dosažení únosnosti konstrukce a zkoušky prototypové. 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 odtláčení na hodnotu, která odpovídá zatížení  $G_s$ , přičemž dle ČSN 73 2030 má být poměr menší než  $\lambda_1 = 0,25$  resp. 25 %. U obou schodišť byla podmínka splněna (Tab. 6).

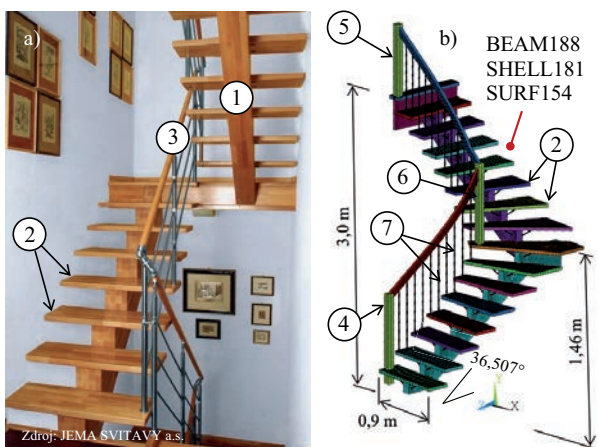
**Tab. 6:** Maximální svislé posunutí  $U_Y$  [mm] a posouzení podle ČSN 73 2030 [11].

Schodiště	$G_s + V_s$	$G_s + V_d$	$G_s$	$P$ [%]	Podmínka
Var A	20,66	31,05	3,87	12,5	$P < \lambda_1$
Var B	13,48	28,75	3,48	12,1	$P < \lambda_1$

Z (Tab. 5) a (Tab. 6) vyplývá, že modifikovaná segmentová schodiště s jednostranně zavěšenými stupni splňují požadavky EAD 340006-00-0506 i ČSN 73 2030 a bylo možné je uplatnit při výrobě.

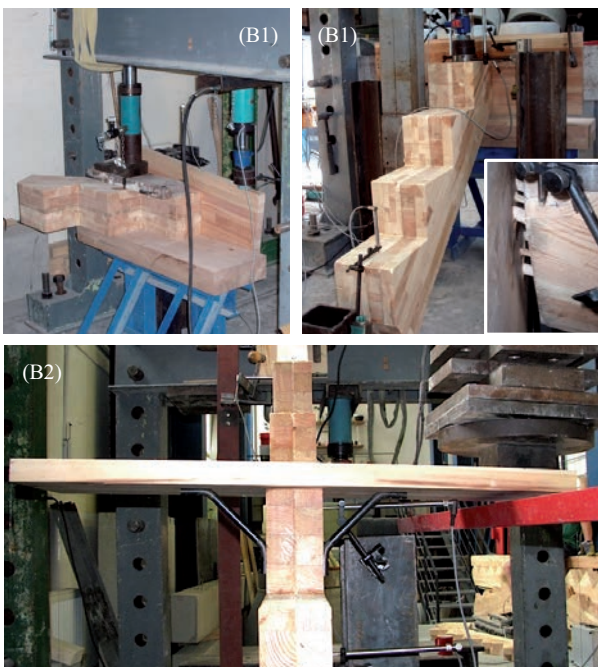
#### 4.4.2 SEGMENTOVÉ SCHODIŠTĚ SE STŘEDOVOU SCHODNICÍ – S2

Nosným prvkem segmentového schodiště se středovou schodnicí je masivní středová schodnice (1), která je v závislosti na dispozici schodišťového prostoru a jeho půdorysném tvaru přímá nebo půdorysně zalomená (Obr. 17). V případě obou variant je schodiště tvořeno dřevěnými stupnicemi v některých případech s výztuhami (2) a madlem (3), které je umístěno na vnitřní straně schodiště. Schodiště je doplněno o sloupky u nástupního (4) a výstupního stupně (5), popř. vnitřní sloupky (6). Zábradelní výplň může být tvořena soustavou ocelových táhel (7) nebo jiným způsobem.



**Obr. 17:** Prvky segmentového schodiště s přímou (a) a zalomenou (b) středovou schodnicí.

Pro identifikaci kritických detailů bylo zvoleno schodiště s konstrukční výškou 3,0 m a sklonem schodišťových ramen  $36,507^\circ$  (Obr. 17), ve dvou variantách – s přímou (a) a půdorysně zalomenou schodnicí (b) s tl. 0,2 m a tl. 0,1 m, které byly vytvořeny ze spárovek tl. 0,05 m [39]. U obou variant schodišť byl uvažován stejný počet schodišťových stupňů (16 ks) jako v případě segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi. V případě půdorysně zalomeného schodiště bylo v obou schodišťových ramenech uvažováno po 8 stupních. Stupně tvořené stupnicemi tl. 0,04 m (pozn. využití závěru a modifikace u schodiště popsaného



**Obr. 18:** Výsekové experimentální modely.

v kapitole 4.4.1) byly podepřeny v polovině rozpětí schodnicemi, ke kterým byly stupně připevněny prostřednictvím trnů a hmoždin a současně byly podporovány dvojicí výztuh – diagonálních vzpěr  $\varnothing 16$  mm (Obr. 18).

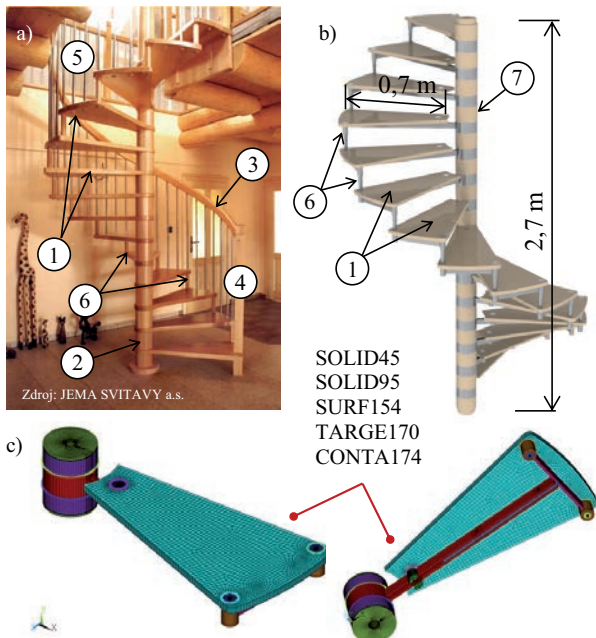


**Obr. 19:** Experimentální model přímé schodnice v měřítku 1:1.

aplikováno v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14]. Analýzou výsledků a jejich vyhodnocením bylo zjištěno, že k největšímu namáhání dochází v místě (B1) vzájemného spojení schodnice s čelní deskou u výstupního stupně, (B2) podepření stupnic diagonálními vzpěrami a (B3) připojení půdorysně zalomených schodnic.

Místa s koncentrací namáhání byla experimentálně zkoušena na výsekových modelech (Obr. 18) a modelu přímé schodnice v měřítku 1:1 (Obr. 19) s doplněním o numerické analýzy provedené pomocí 3D výpočtových modelů. S využitím tohoto postupu byla navržena variantní řešení identifikovaných detailů (B1) a (B2), jejichž ověření bylo provedeno detailní numerickou analýzou.

#### 4.4.3 SEGMENTOVÉ VŘETENOVÉ SCHODIŠTĚ BEZ VNĚJŠÍ SCHODNICE – S3



**Obr. 20:** Prvky segmentového vřetenového schodiště bez vnější schodnice.

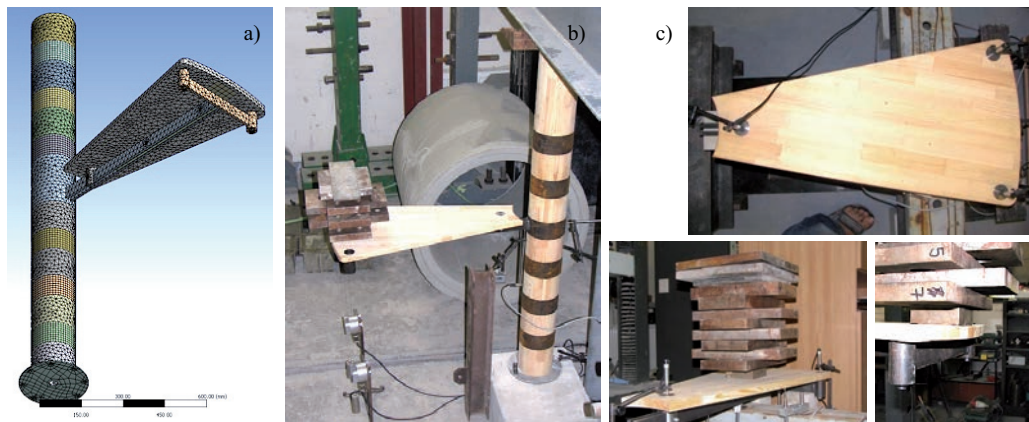
Kritická místa byla zjištěna s využitím výpočtového programu ANSYS a 3D výpočtových modelů, které byly sestaveny podle závěrů kapitoly 4.3. Výpočtový model pro variantu schodiště s půdorysným zalomením je zobrazen na (Obr. 17). Způsob modelování chování dřeva byl proveden stejným způsobem jako v případě zjištění kritických míst segmentového schodiště v kapitole 4.4.1, tj. pomocí ortotropního materiálového modelu se zanedbáním průběhu letokruhů (Obr. 3), který byl doplněn o Tsai-Wu a Hoffmanovo kritérium porušení. Zatížení bylo

Schodiště (Obr. 20) je obdobou segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni bez schodnice na straně nosné zdi pouze výstupní čára není přímá. Je tvořeno dřevěnými stupnicemi (1), sloupovým dřevěným vřetenem (2), masivním madlem (3), sloupky u nástupního (4) a výstupního stupně, soustavou ocelových táhel (5) a distančními prvky (6), které vymezují výškovou polohu stupnic.

V rámci rozvoje a vývoje tohoto typu schodiště bylo řešeno možné snížení tloušťky stupnic a eliminace počtu ocelových táhel, která propojují stupnice s masivním zakřiveným madlem, a tak zajišťují jejich vzájemné spolupůsobení. K dosažení tohoto cíle byl použit postup, který je detailně popsán v kapitole 4.4.1, tedy přístup využívající detailní numerickou analýzu na globálním modelu s identifikací míst se zvýšeným namáháním, jejich



ověřením pomocí výsekových modelů a následným návrhem modifikací, které byly ověřeny numerickou analýzou, a to s ohledem na dobrou shodu mezi výsledky numerické analýzy a experimentálních testů.



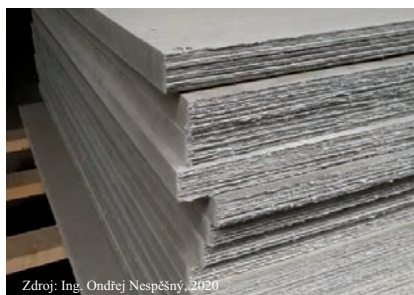
**Obr. 21:** Výsekový výpočtový (a) a experimentální model (b) a průběh zatěžovací zkoušky modifikovaných stupnic tl. 0,024 m s ocelovými podpůrnými prvky (c).

Globální odezva konstrukce schodiště výšky 2,7 m tvořené 15 stupni (Obr. 20), na zatížení aplikované v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14] byla zjištěna s využitím výpočtového programu ANSYS při modelování chování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu se zanedbáním průběhu letokruhů (Obr. 3), který byl doplněn o Tsai-Wu a Hoffmanovo kritérium porušení.

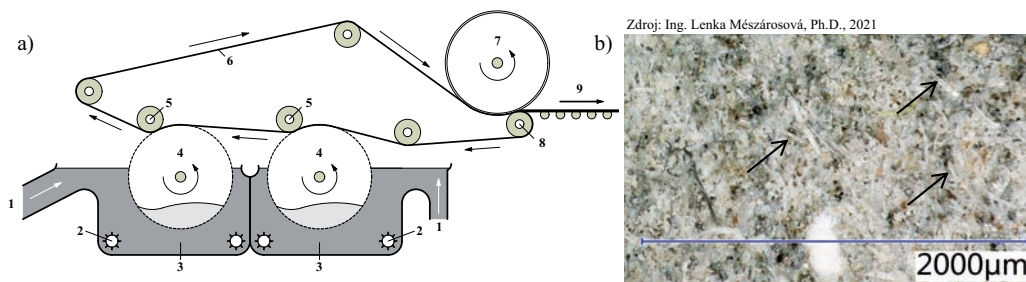
Cílem dalšího postupu byla úprava nosného dřevěného vřetene schodiště (2) na (Obr. 20) na variantu využívající kombinaci dřevěných distančních prvků vřetene a ocelových podpůrných prvků (7) z oceli S235 (Obr. 20). Navržená modifikace umožnila úpravu tl. stupnic až na tl. 0,024 m s minimalizací počtu ocelových táhel a využitím distančních prvků mezi stupnicemi ze schodiště popsané v kapitole 4.4.1. Uvedené úpravy byly experimentálně ověřeny na výsekových modelech (Obr. 21), přičemž výsledné hodnoty poměrů 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  $G_s$ , bylo menší než 8 %, tedy byl splněn požadavek ČSN 73 2030 [11] poměru menšího než  $\lambda_1 = 0,25$  resp. 25 %.

## 5 SEGMENTOVÁ SCHODIŠTĚ Z CEMENTOVLÁKNITÝCH DESEK

Cementovláknité desky (CFB – cement fibre boards) lze charakterizovat jako kompozitní desky (Obr. 22) na bázi cementu a výztužných organických vláken zohledňující environmentální přístup. S ohledem na jejich mechanické vlastnosti a požární odolnost mají řadu uplatnění v pozemním stavitelství [48]. Jejich využití je možné ve formě ztraceného bednění [37], interiérových akustických podhledů [34], fasádních panelů [54], obkladů soků nebo je lze použít ve skladbách konstrukcí interiérových stěn. Vzhledem k jejich ověřeným vlastnostem proti elektrickému oblouku je lze také využít i jako kabelové lávky pro vedení elektroinstalace.



**Obr. 22:** Cementovláknité desky.

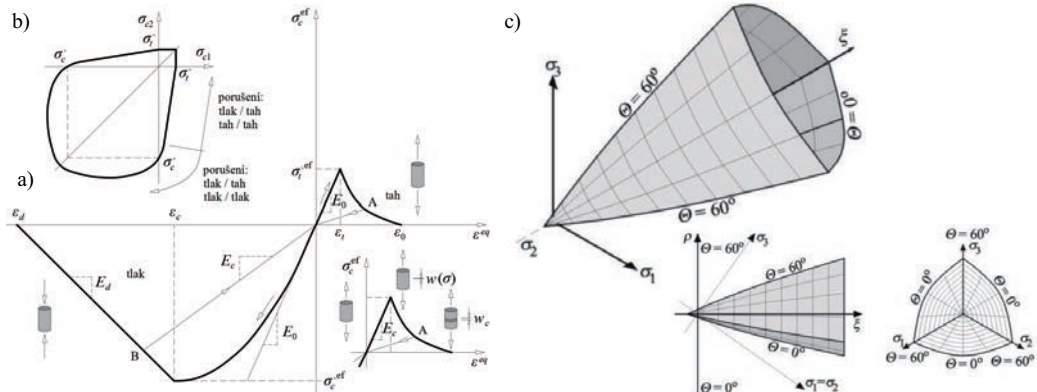


**Obr. 23:** Schéma hlavní části Hatschekova stroje na výrobu CFB (a) – (1) suspenze, (2) rotující válec, (3) inicializační kád', (4) válcové síto, (5) formující válec, (6) plst', (7) akumulací válec a snímek vnitřní struktury materiálu CFB s viditelnými výztužnými vlákny (b).

Princip výroby CFB [52] vychází z Hatschekovy technologie [29]. Vstupní surovinou je cementová suspenze, do které se přidávají výztužná celulózová vlákna nebo vlákna z PVA, PP. V rámci výrobního postupu (Obr. 23) se vrstvením tenkých vrstev vláknocementu na akumulacím válci vytváří tzv. monodesky v tl. do 0,006 m. Vlastní CFB (Obr. 22) vznikají postupným vrstvením monodesek s následným stlačením v plošném hydraulickém lisu. Působením tlaku dochází jednak k odstranění vody, a také ke vzájemnému propojení monodesek v jeden celek. Aplikací uvedeného výrobního postupu lze vytvořit CFB o výsledné limitní tl. až 0,04 m, při které však často dochází při zrání k samovolné delaminaci jednotlivých monodesek. Pro další rozvoj použití CFB bylo na základě dlouhodobých testů zvoleno používat desky s maximální tloušťku 0,03 m, u kterých již nedochází k samovolné delaminaci při zrání, a také k jejich deformacím nebo k porušení povrchu.

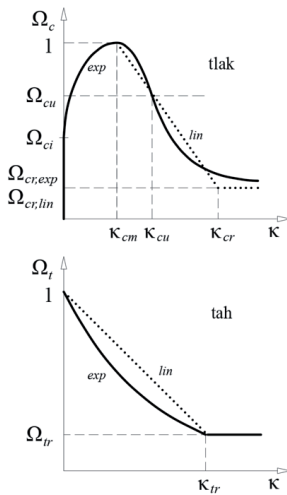
## 5.1 PŘÍSTUPY GEOMETRICKÉHO MODELOVÁNÍ CFB A JEHO CHOVÁNÍ PŘI ZATÍŽENÍ

Materiál CFB lze zařadit do skupiny kvazikřehkých materiálů podobně jako beton. V případě analýz CFB pomocí metody konečných prvků lze v závislosti na typu a účelu prováděné analýzy použít několik možných přístupů geometrického modelování a modelování chování materiálu. Je možné použít specializované programy pro analýzy kvazikřehkých materiálů, např. program ATENA [10] nebo také program ANSYS [2], který byl použit v rámci modelování chování dřeva prezentovaného v kapitole 4. Při analýzách se uvažuje materiálově a geometricky nelineární chování, případně lze do analýz zahrnout i vliv konstrukční nelinearity.

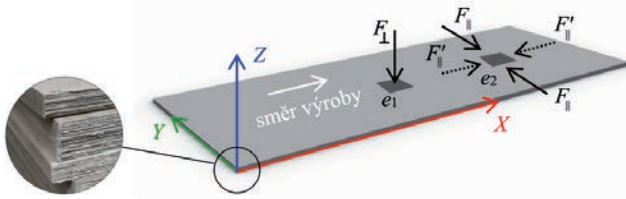


**Obr. 24:** Materiálový model SBETA s porušením materiálu v tahu (a), kritérium porušení pro případ 2osého stavu napjatosti (b), materiálový model Menétrey-Willam (c); zdroj [33].





Obr. 26: Průběh porušení [44].



Obr. 25: Směry XYZ na CFB a způsob zatížení CFB na elementech  $e_1$  a  $e_2$  ve směru  $\perp$  a  $\parallel$ .

Při použití programu ATENA, který obsahuje speciálně navržené algoritmy pro modelování chování kvazikřehkého materiálu od stavu bez porušení až po stav úplného porušení založené na modelu kohézní trhliny lze využít materiálový model SBETA (Obr. 24). Při použití programu ANSYS je modelování chování materiálu CFB umožněno využitím materiálového modelu Menétrey-Willam [44] (Obr. 24), který umožňuje také modelovat jak v tahové, tak i tlakové oblasti postupné porušení využitím lineárního nebo exponenciálního průběhu větve porušení (Obr. 26), při splnění požadavků CEB-FIP Model Code [8].

Materiál CFB lze podle [27] charakterizovat jako materiál s mikrostrukturální anizotropií. Z hlediska výpočtového přístupu je však možné využít obdobné idealizace modelování chování CFB, která byla použita v případě modelování dřeva, resp. jednovrstvých desek z rostlého dřeva (kapitola 4.1). Při výrobě CFB Hatschekovou technologií dochází vlivem otáčení výrobních válců (Obr. 23) k orientování výtuzných vláken ve směru výroby [19].

Současně vlastní CFB (Obr. 22) vzniká vrstvením monodesek a jejich následným stlačením v jeden celek. Tímto výrobním postupem je jednoznačně definován podélný směr  $X$ , který je totožný s převažující orientací výtuzných vláken, resp. směrem výroby, a směry  $Y$  a  $Z$  (Obr. 25). Proto při analýzách je možné použít ortotropní materiálový model.

## 5.2 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

Při použití CFB desek pro návrh nosných konstrukcí pozemních staveb, např. v případě schodnicového schodiště (Obr. 30), je z konstrukčního pohledu nutné kombinovat uspořádání deskového materiálu ve smyslu působícího zatížení. Některé prvky jsou zatěžovány kolmo na střednicovou rovinu, tj. jako deskový prvek (označení  $\perp$ ) a naproti tomu jiné prvky konstrukce jsou zatěžovány rovnoběžně se střednicovou rovinou, tj. jako stěnový prvek (označení  $\parallel$ ). Orientace prvků při zatěžování, resp. směr působícího zatížení je zobrazena na elementech  $e_1$  a  $e_2$  na (Obr. 25).

Pro popis materiálových modelů SBETA a Menétrey-Willam využitých v rámci numerických analýz v návrhové fázi byly pomocí experimentálních testů stanoveny materiálové vlastnosti CFB, které byly podle [48] tvořeny cementem (84,5 %), celulózu (8,0 %), expandovaným perlitem (7 %) a polypropylénovými vlákny (0,5 %). Při stanovování materiálových vlastností byly používány zkušební vzorky CFB tl. 0,03 m, které nebyly ošetřovány, nevykazovaly vady ve formě povrchových trhlin, nebo delaminace. Rozměry zkušebních vzorků vycházely z ČSN EN 408 [18].

Materiálové vlastnosti byly zjištěny pro oba možné způsoby zatížení CFB, tj.  $\perp$  a  $\parallel$  (Obr. 25). Pro stanovení modulu pružnosti ( $MOE$ ) a pevnosti v tahu za ohybu ( $MOR$ ) stanovené metodou tříbodového (3BO) a čtyřbodového (4BO) ohybu (geometrické uspořádání obdobné jako na (Obr. 4) byly používány vzorky o rozměrech  $30 \times 30 \times 570$  mm (Obr. 27). Pro stanovení pevnosti v prostém tahu ( $f_t$ ) byla používána tělesa o rozměrech  $30 \times 40 \times 40$  mm a pro stanovení pevnosti

v prostém tlaku ( $f_c$ ) byla používána tělesa ve tvaru krychle o délce strany 30 mm (Obr. 27). Dále byla stanovena objemová hmotnost CFB ( $1718 \text{ kg/m}^3$ ), nasákavost (15 %) a bobtnání (0,2 %).



**Obr. 27:** Stanovení modulu pružnosti  $MOE$  a pevnosti v tahu za ohybu  $MOR$  pro 3BO (a), 4BO (b), pevnosti v prostém tahu  $f_i$  (c), pevnosti v prostém tlaku  $f_c$  (d), pevnosti lepeného spoje dvou CFB v tahu  $f_{g,t}$  (e) a ve smyku  $f_{g,s}$  (f).

**Tab. 7:** Experimentálně stanovené materiálové vlastnosti CFB.

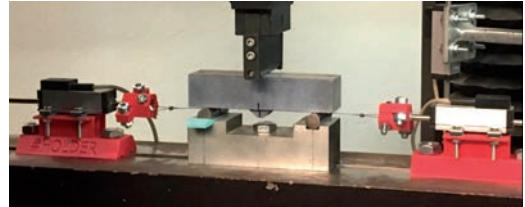
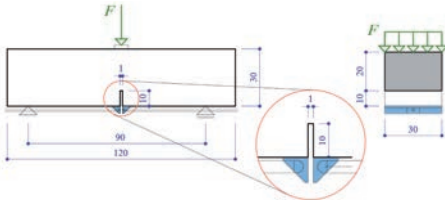
Materiálové vlastnosti	Zatížení kolmo na rovinu CFB ( $\perp$ ) v [MPa]	Zatížení v rovině CFB ( $\parallel$ ) v [MPa]
modul pružnosti v 4BO ( $MOE_4$ )	14417,04	15245,50
modul pružnosti v 3BO ( $MOE_3$ )	14175,54	14213,15
pevnost v tahu za ohybu v 4BO ( $MOR_4$ )	21,00	20,77
pevnost v tahu za ohybu v 3BO ( $MOR_3$ )	21,84	21,73
pevnost v prostém tlaku $f_c$	67,71	56,01
pevnost v prostém tahu $f_i$	2,16	10,13
pevnost lepeného spoje dvou CFB v tahu $f_{g,t}$	min $f_i$	–
pevnost lepeného spoje dvou CFB ve smyku $f_{g,s}$	–	7,03

Z výsledků experimentálně stanovených materiálových vlastností uvedených v (Tab. 7) je patrné, že hodnoty modulu pružnosti ( $MOE$ ) a pevnosti v tahu za ohybu ( $MOR$ ) při zatěžování kolmo na rovinu desky ( $\perp$ ) jsou s hodnotami stanovenými při zatěžování ve střednicové rovině ( $\parallel$ ) srovnatelné. Naopak u pevností je patrný vliv orientace CFB vůči působícímu zatížení, přičemž větší pevnost v prostém tahu  $f_i$  materiálu CFB se projevuje v případě zatížení působícího ve střednicové rovině, což je výhodné s ohledem na způsob výroby částí schodnicového schodiště.

**Tab. 8:** Experimentálně stanovené materiálové vlastnosti CFB.

Orientace vzorků vůči směru výroby		Lomová energie $G_F$ [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Lomová houževnatost $K_{Ic}$ [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]	
	např. V1– $\perp$	V1– $\perp$	578,40	2,11
		V1– $\parallel$	284,30	2,11
		V2– $\perp$	435,74	1,91
		V2– $\parallel$	270,96	1,82

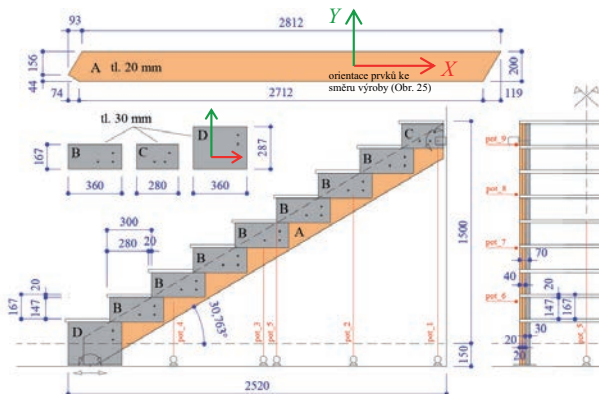
Parametry (Tab. 8) potřebné pro popis materiálového chování v částech po dosažení jejich pevnosti v tahu  $f_t$  (Obr. 24) a (Obr. 26), tj. lomová energie  $G_F$  a lomová houževnatost za podmínek rovinné deformace  $K_{Ic}$ , byly určeny podle RILEM TC-50 FMC [53] pomocí vzorků o rozměrech  $30 \times 30 \times 120$  mm, které zachovávají poměr vzdálenosti podpor 90 mm a výšky vzorku ( $3 \times$  výška vzorku) potvrzený v [36] (Obr. 28). Vzorky byly v polovině rozpětí opatřeny zářezem tl. 1 mm a výšky 10 mm.



Obr. 28: Uspořádání zatěžovací zkoušky.

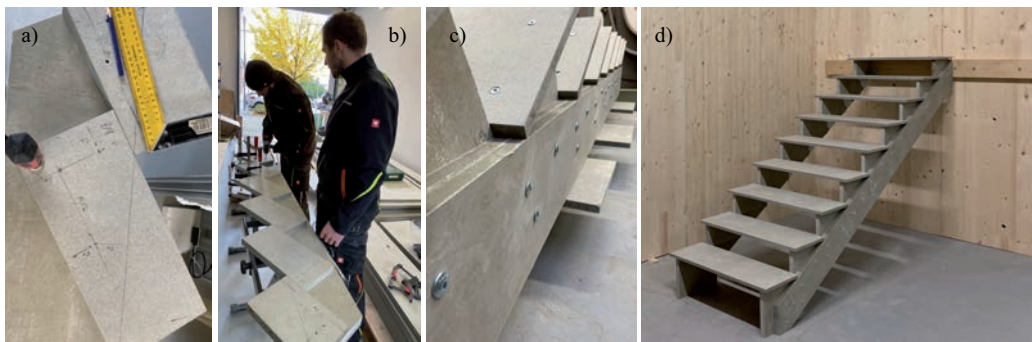
### 5.3 SCHODNICOVÉ SCHODIŠTĚ Z CFB

Pro vývoj konstrukčního systému schodnicového schodiště z CFB bylo zvoleno přímé jednoramenné schodiště s 9 stupni, s konstrukční výškou 1,5 m, šířkou schodišťového ramene 0,9 m a sklonem  $30,76^\circ$  (Obr. 29). Uvažované schodiště svými rozměry odpovídá nástupnímu a výstupnímu rameni u běžného dvouramenného schodnicového schodiště v rodinných domech s konstrukční výškou 3,0 m.



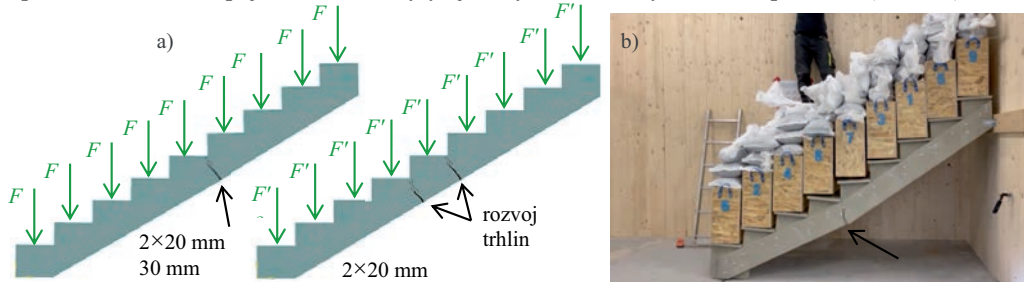
Obr. 29: Segmentové schodiště z CFB (Var I).

První vývojovou variantou schodnicového schodiště z CFB (Var I) bylo schodiště tvořené segmenty, které byly připraveny z CFB o rozměrech  $3,0 \times 1,2$  m a tl. 0,02 m a 0,03 m. Všechny segmenty schodišťového ramene byly vzájemně spojeny pomocí šroubů do betonu HILTI. Vlastní výroba schodišťového ramene probíhala v laboratoři Ústavu pozemního stavitelství, FAST VUT.



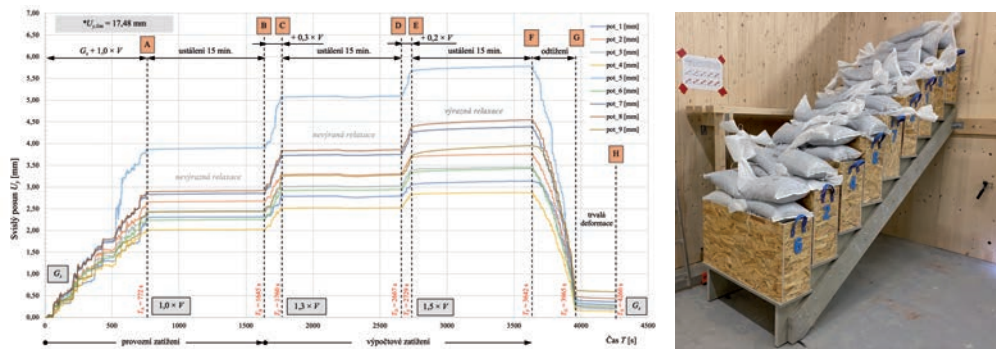
Obr. 30: Montáž schodnicového schodiště ze segmentů (a) až (c) a pohled na schodišťové rameno ve zkušebním polygonu v laboratoři Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT (d).

Ověření návrhu rozměrů nosných prvků schodiště, tj. stupňů tl. 0,02 m a schodnic tl. 0,04 m (ze dvou desek 0,02 m) s příložkami tl. 0,03 m bylo provedeno pomocí numerické analýzy s využitím výpočtového programu ATENA a 2D výpočtového modelu (Obr. 31), který byl sestaven podle kapitoly 5.1. Chování CFB bylo popsáno materiálovým modelem SBETA (Obr. 24) při uvažování materiálových vlastností CFB podle (Tab. 7) a (Tab. 8). Zatížení bylo aplikováno v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14] tak, aby modelovalo statickou zatěžovací zkoušku. V závislosti na způsobu uvažování spojení schodnic byly zjištěny dvě varianty možného porušení (Obr. 31).



**Obr. 31:** Způsoby možného porušení zjištěné numerickou analýzou ve výpočtovém programu ATENA (a) a okamžik po porušení při statické zatěžovací zkoušce (b).

K prokázání globální únosnosti konstrukce segmentového schodnicového schodiště z CFB bylo přistoupeno pomocí statické zatěžovací zkoušky (Obr. 30) a (Obr. 31) v měřítku 1:1. Při zkouškách byla použita metodika využitá při statických zatěžovacích zkouškách dřevěných segmentových schodišť (viz kapitola 4.4.1).



**Obr. 32:** Záznam svislého posunutí měřících bodů  $U_y$  v průběhu statické zatěžovací zkoušky.








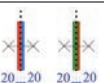
Konstrukce segmentového schodnicového schodiště z CFB byla zatěžována v souladu s ČSN EN 1991-1-1 (730035) [14] tak, aby byla zatěžovacími zkouškami prokázána funkčnost z hlediska mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti. Na stupnici bylo umístěno spojitě rovnoměrné zatížení  $V$ , které bylo ve 2 krocích zvýšeno o 20 % a 30 % (Obr. 32). V extrémním případě na schodiště působilo kromě vlastní tíhy  $G_0$  zatížení  $1,5 \times V$ , tj. při přepočtu hmotnost 1020,6 kg.

Pro stanovení globální únosnosti bylo schodiště zatěžováno až do jeho kolapsu, který nastal při působícím celkovém zatížení 2100,6 kg, což odpovídá plošnému zatížení  $9,26 \text{ kN/m}^2$  (bez uvažování vlastní tíhy konstrukce). Velikost aplikovaného plošného zatížení překročila o 131,5 % hodnotu návrhového užitého plošného zatížení. Schodnicové schodiště z CFB ve Var A tedy splnilo požadavky EAD 340006-00-0506 [21] i ČSN 73 2030 [11].



V rámci další výzkumné a vývojové činnosti byla kombinací numerických analýz (pomocí výpočtového programu ATENA (2D) a ANSYS (3D)) a experimentálního testování konstrukce schodnicového schodiště z CFB ve Var I (Obr. 29) modifikována, a to ve způsobu vzájemného spojení konstrukčních částí (schodnic mezi sebou, schodnic a stupnic), a také se zřetelem na minimalizaci odpadu při výrobě jednotlivých segmentů schodnicového schodiště z CFB o rozměrech 3,0×1,2 m a na způsob přepravy. Celkově byly analyzovány a zkušeny tři další modifikace schodiště (Var II až Var IV), které jsou popsány v (Tab. 9) a na (Obr. 33).

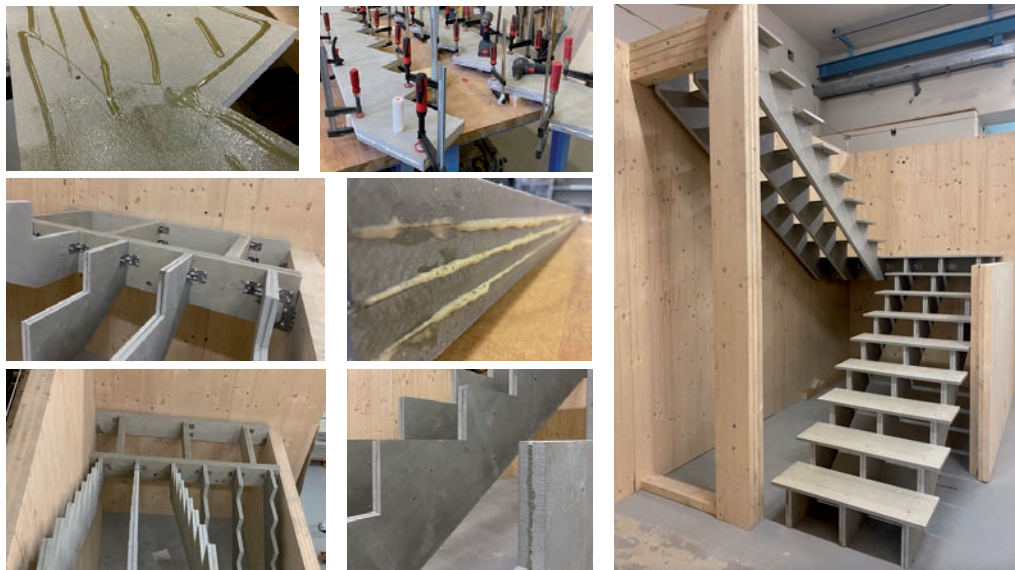
**Tab. 9:** Popis variant řešení schodnicových schodišť z CFB.

Schodiště Var	Tvar schodnice	Příčný řez schodnicí	Stupnice tl. [mm]	Spojení schodnic	Posouzení podle ČSN 73 2030
I			20	šroubované	vyhovělo
II			20	šroubované	nevyhovělo
III			20	šroubované lepené	vyhovělo
IV			20	šroubované lepené	vyhovělo



**Obr. 33:** Vývojové fáze schodišť viz (Tab. 9).

Na základě vyhodnocení numerických analýz a experimentálních testů bylo pro dlouhodobé sledování chování segmentového schodiště z CFB (Obr. 34) zvoleno uspořádání schodiště odpovídající variantě Var III, ve které je schodnice tvořená ze dvou CFB tl. 0,02 m, které jsou vzájemně spojeny prostřednictvím šroubového spoje za současného slepení. S ohledem na snížení namáhání stupnice tl. 0,02 m byla u funkčního vzorku schodiště doplněna třetí středová schodnice.



**Obr. 34:** Fotografie z výroby funkčního vzorku dvouramenného levotočivého schodnicového segmentového schodiště z CFB a pohled na schodiště ve zkušebním polygonu v laboratoři Ústavu pozemního stavitelství, FAST VUT.

## 6 SCHODIŠTĚ ZHOTOVENÁ ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ



**Obr. 35:** 3D stěna vytištěná zaměstnanci ÚPST, FAST VUT.

První informace o aditivní technologii, resp. 3D tisku, jsou datovány na začátek 80. let 20. století [28]. Betonové směsi pro 3D tisk se však začaly používat až začátkem 21. století [40]. Využití 3D tisku betonovou směsí je tedy tématem, které je poměrně nové a s ohledem na rozvoj přístupu Stavebnictví 4.0, u kterého se předpokládá kromě digitalizace také i využívání robotizace a automatizace se jedná o téma velmi aktuální. Proto je také jedním z rozvojových témat FAST VUT, která vytvořila v rámci Centra AdMaS Laboratoř robotizace a 3D tisku. Současně je i rozvojovým tématem Ústavu pozemního stavitelství (ÚPST), kde je toto téma rozvíjeno z pohledu navrhování nosných konstrukcí (garant autor) a z pohledu tepelné techniky (Obr. 35).

Použití 3D tisku betonovou směsí lze charakterizovat jako metodu PEM (paste extrusion modelling), která je založena na principu tisku

hmoty (betonové směsi) vytlačované pod tlakem tiskovou hlavou nejdříve na tiskovou podložku a poté vrstvu po vrstvě.

Využití metody PEM je ve stavebnictví stále běžnější a má potenciál změnit způsob, jakým se do budoucna budou stavět budovy, ale prozatím má své limity, kterými jsou používané materiály, způsob vyztužování, využití obecných algoritmů pro realizaci tisku s ohledem na složení materiálu a rychlosti jeho tuhnutí a tvrdnutí, nenastavení systému zkušebních metod a legislativních postupů včetně absence normových předpisů.

I když se v případě materiálu, který se používá pro 3DCP, lze setkat s označením betonová směs, tak z pohledu materiálového inženýrství se nejedná o klasickou betonovou směs s potřebnými frakcemi kameniva, ale jedná se o betonovou směs s maximální zrnitostí kameniva do 0,002 m, která je navíc doplněna o urychlovače tuhnutí a tvrdnutí s ohledem na rychlost tisku nebo výstavby. Příklad složení betonové směsi je uveden v [38].

Pro autora je téma aditivní technologie a její využití ve stavebnictví pro návrh nosných konstrukcí rozvojové. V rámci přístupu k tomuto tématu by chtěl využít ověřeného přístupu, tj. využití numerického modelování a experimentálního testování. V prvotní fázi výzkumu tohoto tématu je nutné stanovit materiálové vlastnosti pro popis materiálového modelu. Zde se předpokládá využití stejného přístupu jako v případě CFB, tj. využití materiálového modelu SBETA [10] a výpočtového programu ATENA nebo materiálového modelu Menétrey-Willam [44] a výpočtového programu ANSYS, (Obr. 24).

Pro prvotní testy s aditivní technologií a 3DCP byla zvolena speciální pytlovaná prefabrikovaná směs pro 3DCP MASTERFLOW 3D 100. Jedná se o materiál [43], který po smísení s vodou v krátkém časovém intervalu dosahuje vysokých hodnot pevnosti v tlaku (po 6/24 hodinách min. 1/30 MPa) a v tahu za ohybu (po 1/28 dnech min. 5/7 MPa) a současně vykazuje velmi malé smrštění a je objemově stálý. Má také velkou přílnavost k betonářské výztuži.

Pro stanovení materiálových vlastností byly v Laboratoři robotizace a 3D tisku Centra AdMaS vytištěna zkušební tělesa (Obr. 36), pomocí kterých budou postupně stanovovány materiálové vlastnosti, stejně jako v případě CFB v kapitole 5. Kromě samotných zkušebních těles byla připravena i tělesa pro ověření deklarované přílnavosti k betonářské výztuži a tělesa pro zjištění vlivu betonářské výztuže. Jelikož je vývoj vyztužování konstrukcí vytvořených 3DCP technologií na počátku rozvoje byla v rámci 3DCP ověřena možnost umístění betonářské výztuže do tisknutého průřezu.

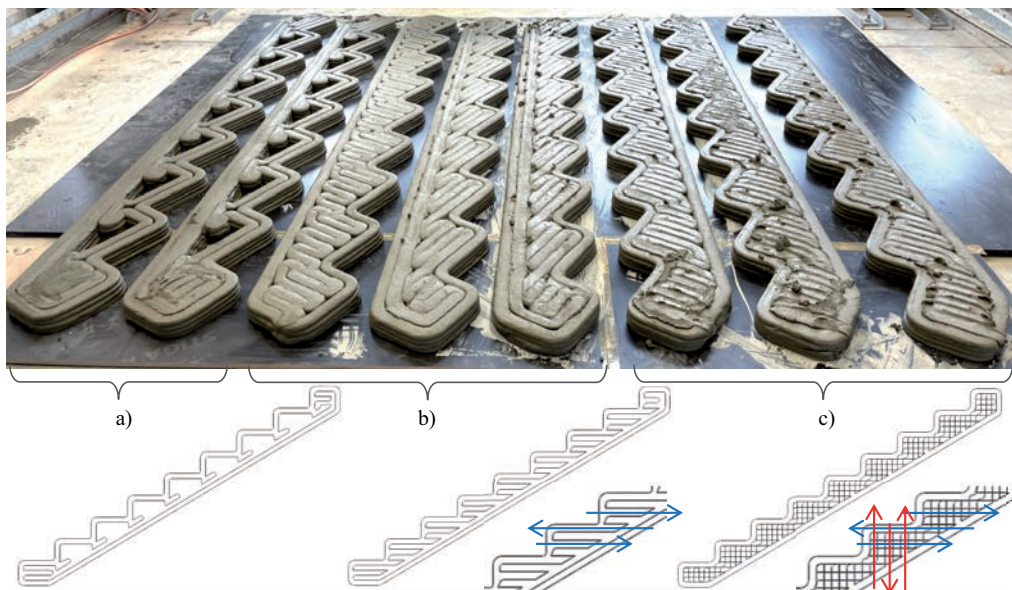


**Obr. 36:** Zkušební vzorky pro stanovení materiálových vlastností pytlované prefabrikované směsi 3DCP MASTERFLOW 3D 100 používané pro 3DCP.

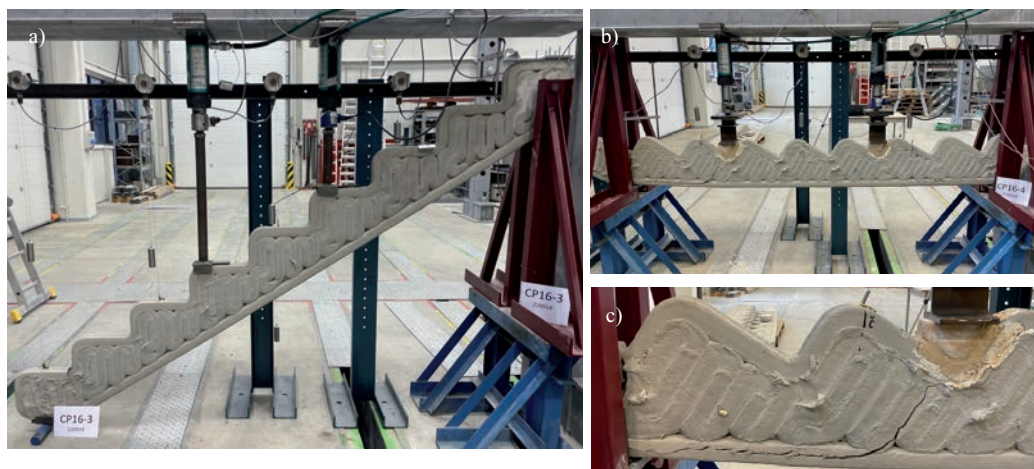
Jelikož se autor dlouhodobě zabývá návrhy a modifikacemi interiérových schodišť, chce se dále danému tématu věnovat a rozvíjet jej i do budoucna ve spojení s technologií 3DCP. Z toho důvodu



byly při tisku zkušebních těles pro stanovení materiálových vlastností vytištěny i zkušební tělesa schodnic schodnicového schodiště (Obr. 37), jejichž základní geometrie vycházela z geometrie schodnic schodnicového schodiště z CFB. Při tisku byla zvolena jeho rychlost a extruze prefabrikované směsi tak, aby tisknutá šířka jedné vrstvy byla 0,045 m. Při uvedeném nastavení byla výška jedné vrstvy 0,015 m. Schodnice, které mají tl. 0,06 m jsou tvořeny 4 vrstvami, jejichž uspořádání bylo uvažováno v několika variantách. Schodnice byly vyztuženy při dolním okraji betonářskou výztuží  $\varnothing 10$  mm, jejich návrh byl proveden s využitím výpočtového programu ATENA (Obr. 39).

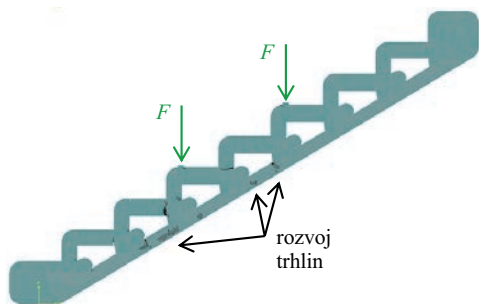


**Obr. 37:** Schodnice vytištěné pomocí pytlované prefabrikované směsi 3DCP MASTERFLOW 3D 100 používané pro 3DCP s vyznačením směru tisku vrstev.



**Obr. 38:** Schodnice ve variantě (c) z (Obr. 37) vytvořené 3DCP v laboratoři Centra AdMaS před (a) a po zatěžovací (b) zkoušce s detailem porušení části (c).





**Obr. 39:** Příklad analýzy schodnice z 3DCP ve variantě (a) z (Obr. 38).

ohybem je zobrazeno na (Obr. 38) s příkladem tvaru porušení. V další fázi řešení budou schodnice modifikovány na základě numerických analýz se zpřesněným materiálovým modelem a budou experimentálně testovány pomocí modelů v měřítku 1:1.

Varianty uspořádání tisku vrstev jsou zobrazeny na (Obr. 37). Ve variantě (b) byly vrstvy orientovány pouze ve vodorovném směru a v případě varianty (c) byly uspořádány šachovnicově, tj. střídaly se vrstvy ve vodorovném a svislém směru pro zajištění jejich vzájemného spolupůsobení a maximálního vyplnění plochy mezi perimetrem, který vymezil tvar schodnice. Geometrie varianty (a) jejíž numerická analýza je zobrazena na (Obr. 39) vycházela z optimalizačního výpočtu.

Schodnice byly pro stanovení jejich únosnosti zatěžovány v laboratoři Centra AdMaS. Uspořádání zatěžovací zkoušky čtyřbodovým

## 7 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI

### 7.1 VÝZKUMNÁ ČINNOST

V rámci výzkumné činnosti by se chtěl autor i nadále zabývat problematikou návrhu nosných konstrukcí pozemních staveb s využitím prezentovaného přístupu využívajícího metody numerického modelování a experimentálního testování. S tímto procesem souvisí řada dílčích témat např. rozvoj nebo upřesnění materiálových modelů, rozvoj přístupů pro modelování vzájemné interakce konstrukčních prvků či jejich částí, zejména v případě využití aditivní technologie, rozvoj metod pro popis chování nosné konstrukce nebo jejich prvků.

Oblasti další výzkumné činnosti lze shrnout do těchto bodů:

- využití aditivní technologie (3DCP) pro návrh nosných konstrukcí pozemních staveb s experimentální validací s prvotním zaměřením na problematiku schodišť pro získání uceleného pohledu na problematiku a možnou vzájemnou komparaci, s následným rozvojem tohoto tématu na širší problematiku obecného využití aditivní technologie v rámci oboru Pozemního stavitelství,
- řešení způsobu vyztužování nosných konstrukcí pozemních staveb vyrobených aditivní technologií,
- využití robotizace a automatizace v rámci oboru Pozemní stavby.

I nadále budou výsledky výzkumné činnosti publikovány ve vědeckých a odborných časopisech, na vědeckých a odborných konferencích s cílem přenosu získaných poznatků k odborné komunitě. Současně budou výsledky využívány v rámci pedagogické činnosti.

### 7.2 PEDAGOGICKÁ ČINNOST

V rámci pedagogické činnosti by rád autor působil v oboru Pozemní stavby se zaměřením na začleňování nových poznatků výzkumu o nosných konstrukcích pozemních staveb, jejich vývoji, aplikacích nových environmentálních materiálů a materiálů z obnovitelných zdrojů, možnosti využití numerických analýz a experimentálních testů do procesu výuky ve všech stupních studia (BSP, NSP, DSP), s primárním cílem zvýšit kvalitu studia a rozšířit vzdělanostní portfolio studentů FAST VUT.

Velkou aktuální výzvou stavebnictví, kterou by rád autor rozvíjel nejen v rámci výzkumné, ale i v rámci pedagogické činnosti, je úprava výukového procesu respektujícího přístup Stavebnictví 4.0,

tj. digitalizace, automatizace, robotizace a automatizace zprůmyslnění výrobního procesu, včetně využití BIM, augmented reality (AR) a artificial intelligence (AI).

V předávání informací studentům se bude autor věnovat i nadále, a to nejenom v rámci přednáškové činnosti a vedení cvičení, ale i v rámci individuální práce se studenty při individuálních konzultacích specializovaných projektů, projektů ateliérové tvorby nebo při vedení bakalářských (obhájené k datu podání pojednání: 89×), diplomových (35×) a doktorských prací (2×).

Při pedagogické praxi na FAST VUT se autor snaží oslovovat nadané studenty a pracovat s nimi již v průběhu jejich bakalářského nebo navazujícího magisterského studia. Nejprve je začleňuje do přípravy pedagogického a výzkumného procesu v pozici studentské pedagogicko-vědecké síly (projekt FAST VUT) a posléze je etabloje do výzkumných projektů externích poskytovatelů nebo do projektů specifického výzkumu IGA VUT. Tímto postupem začleňování získávají nadaní studenti užší vztah k alma mater, ke studovanému oboru a problematice pozemního stavitelství a současně si tak rozvíjí odborný a výzkumný potenciál. Současně lze tímto postupem vytipovat vhodné kandidáty pro studium v doktorském studijním programu. V rámci přístupu ke studentům podporuje autor týmovou spolupráci a klade velký důraz na rozvoj individuálního a kreativního myšlení při zpracování řešené tematiky.

## 8 LITERATURA

- [1] *ABAQUS®*, Version 6.9 – Standard User's Manual. USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2009.
- [2] *ANSYS® Academic Research, Release 14.0* – Help System, ANSYS Parametric Design Language Guide, ANSYS Element Reference, ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide. Southpointe, USA: ANSYS, Inc., 2011 (a pozdější verze).
- [3] BATHE, K. J. *Finite element procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 2006., 2006. ISBN 09-790-0490-X.
- [4] 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.
- [5] BERTHELOT, J. M. *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. New York: Springer, 1999, XXV, 645 s. Mechanical engineering series (Berlin, Germany). ISBN 03-879-8426-7.
- [6] BLAŽEK, J. a E. HORÁČEK. *Nepřímé metody experimentální statiky*. Praha: SNTL, 1959.
- [7] BODIG, J. a J. R. GOODMAN. Prediction of Elastic Parameters for Wood. *Wood Science*. 1973, roč. 5, č. 4, s. 249–264.
- [8] CEB-FIP Model Code 90. CEB Bulletin. 1993213/214. Thomas Telford Ltd. ISBN: 978-0-7277-1696-5, London, 460 p.
- [9] CRAMER, S., D. KRETSCHMANN, R. LAKES a T. SCHMIDT. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. *Holzforschung*. 2005, roč. 59, č. 5.
- [10] ČERVENKA, V., L. JENDELE a J. ČERVENKA, *ATENA Program Documentation – Part I: Theory*. Cervenka Consulting, Prague, 2021.
- [11] ČSN 73 2030. *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [12] ČSN 73 2031. *Zkoušení stavebních objektů, konstrukcí a dílců – Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1985.
- [13] ČSN 73 4130 (734130). *Schodiště a šikmé rampy – Základní požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

- [14] ČSN EN 1991-1-1 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [15] ČSN EN 1995-1-1 (73 1701). *Eurokód 5 – Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [16] ČSN EN 338 (73 1711). *Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti*. Brusel: CEN, Evropský výbor pro normalizaci, 2010.
- [17] ČSN EN 384 (731712). *Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2010.
- [18] ČSN EN 408+A1 (731741). *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [19] DELVASTO, S., E.F. TORO, F. PERDOMO a R. Mejía DE GUTIÉRREZ. An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*. 2010, 24(2), 187-192. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010.
- [20] 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.
- [21] *EAD 340006-00-0506 Prefabricated stair kits*. Brusel: European Organisation for Technical Assessment (EOTA), 2016; dříve používané označení ETAG008.
- [22] EASTMAN, Ch., P. TIECHOLZ, R. SACKS a L. KATHLEEN. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2011. ISBN 978-047-0541-371.
- [23] FLEMING, P. H. a M. H. RAMAGE. Full-scale construction and testing of stress-laminated columns made with low-grade wood. *Construction and Building Materials*. 2020, 230(2020), 1-11. ISSN 0950-0618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116952.
- [24] FLORIAN, A. An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 1992, roč. 7, č. 2, s. 123-130.
- [25] 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.
- [26] GILLIS, P. P. Orthotropic elastic constants of wood. *Wood Science and Technology*. 1972, roč. 6, č. 2, s. 138-156.
- [27] GORZELAŃCZYK, T., M. PACHNICZ, A. RÓŻAŃSKI a K. SCHABOWICZ. Identification of microstructural anisotropy of cellulose cement boards by means of nanoindentation. *Construction and Building Materials*. 2020, 257. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119515.
- [28] HAGER, I., A. GOLONKA a R. PUTANOWICZ. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 151, 292-299. ISSN 18777058. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.357.
- [29] HATSCHEK L. Einrichtung zur kontinuierlichen abfalllosen Herstellung von Kunststeinplatten bzw. -rohren aus einer Stoffbahn, PATENT, Austria. AT68110B. Reg. 1913-07-11.
- [30] HOFFMAN, O. The Brittle Strength of Orthotropic Materials. *Journal of Composite Materials*. 1967, roč. 1967, č. 1, s. 200–206.
- [31] 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.
- [32] IDEA StatiCa – posouzení průřezů a návrh výztuže. ČR: IDEA StatiCa s.r.o., 2020.

- [33] JASINSKI, R. Validation of Elastic-Brittle, and Elastic-Plastic FEM Model of the Wall Made of Calcium Silicate and AAC Masonry Units. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, 603(3). ISSN 1757-8981. doi:10.1088/1757-899X/603/3/032001.
- [34] JUN, D., O. NESPESNY, J. PENCIK, Z. FISAROVA a A. RUBINA. Optimized method for Helmholtz resonator design formed by perforated boards. *Applied Acoustics*. 2021, 184. ISSN 0003682X. doi:10.1016/j.apacoust.2021.108341.
- [35] KARDAK, A. A. a G. B. SINCLAIR. Verification of Submodeling for the Finite Element Analysis of Stress Concentrations. *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification*. 2019, 4(3). ISSN 2377-2158. doi:10.1115/1.4045232.
- [36] KARIHALOO, B. L. Fracture mechanics and structural concrete. New York: Wiley, 1995. ISBN isbn:0-582-21582-x.
- [37] KILDASHTI, K., B. SAMALI a A. MALIK. Experimental and numerical studies on the comparison between stay-in-place- and conventionally-formed reinforced concrete columns under concentric loading. *Construction and Building Materials*. 2020, 258. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119631.
- [38] KRUGER, J., PLESSIS A. D. a G. VAN ZIJL. An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. *Additive Manufacturing*. 2021, 37. ISSN 22148604. doi:10.1016/j.addma.2020.101740.
- [39] LAVICKÝ, M., PĚNČÍK, J., DOHNAL, J., BEČKOVSKÝ, D. a BEČKOVSKÁ, T. Static numeric and experimental analysis of prefabricated winder wooden staircase with central stringer made from Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.). *WOOD RESEARCH*, 2016, vol. 61, no. 4, p. 553-564. ISSN 1336-4561.
- [40] LIM, S., R. BUSWELL, T. LE, R. WACKROW, Simon AUSTIN, Alistair GIBB a Tony THORPE. Development of a Viable Concrete Printing Process. doi:10.22260/ISARC2011/0124.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] MasterFlow 3D 100 | Speciální prefabrikovaná směs pro 3D tisk. Global Portal for Master Builders Solutions. Copyright © MBCC Group.
- [44] Menétrey, P. and Willam, P., (1995), A triaxial failure criterion for concrete and its generalization., *ACI Structural Journal*, 311-318.
- [45] MOSES, D. M. a H. G. L. PRION. Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites. In: *Ansys.net*. 2002.
- [46] 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.
- [47] NAIRN, J. A. *Numerical Modeling of Deformation and Fracture of Wood including Heterogeneity and Anisotropy*. COST Action E35 Meeting, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [48] NESPĚŠNÝ, O., J. PĚNČÍK, D. BEČKOVSKÝ, J. VYSTRČIL a K. ŠUHAJDA. Determination of material and elasticity constants of cement fibre boards to extend field of application. *Construction and Building Materials*. 2021, 306. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124821.
- [49] PASCHALIS, S. A., A. P. LAMPROPOULOS a O. TSIIOULOU. Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members. *Construction and Building Materials*. 2018, 186(2018), 351-366. ISSN 0950-0618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.123.
- [50] PĚNČÍK, J., M. LAVICKÝ, P. KRÁL a Z. HAVÍŘOVÁ. Analysis of Behaviour of Prefabricated Staircases with One-Sided Suspended Stairs. *Drvna industrija*. 2015, 66(2), 147-156. ISSN 12-6772. doi:10.5552/drind.2015.1338.

- [51] POŽGAJ, A., D. CHOVANEC, S. KURJATKO a M. BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2 vyd. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [52] RANACHOWSKI, Z. a K. SCHABOWICZ. *The Fabrication, Testing and Application of Fibre Cement Boards*. Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2018. ISBN 978-1-5275-0576-6.
- [53] RILEM TC-50 FMC Recommendation, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*. 1985, 18(4), 287-290. ISSN 0025-5432. doi:10.1007/BF02472918.
- [54] SCHABOWICZ, K., P. SULIK a Ł. ZAWIŚLAK. Identification of the Destruction Model of Ventilated Facade under the Influence of Fire. *Materials*. 2020, 13(10). ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma13102387.
- [55] TRENZ, J., K. ZLATUŠKA a R. NEČAS. Experimental model of plan curved footbridge supported by arch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 960(4). ISSN 1757-8981. doi:10.1088/1757-899X/960/4/042070.
- [56] 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.
- [57] VÍRA, B. Stavebnictví 4.0. *Časopis Stavebnictví*. 2018, XII(03/2018), 62-64. ISSN 1802-2030.
- [58] Vyhláška č. 268/2009 Sb. *Vyhláška o technických požadavcích na stavby*. In: *Sbírka zákonů*. 12. 8.2009. Částka 81/2009. (zrušena k 1. 7. 2023 a nahrazena Vyhláškou 283/2021 Sb.).
- [59] 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).
- [60] ZIENKIEWICZ, O. C., J. Z. ZHU a R. L. TAYLOR. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2005. ISBN 07-506-6320-0.
- [61] ZUO, Z., J. GONG, Y. HUANG, Y. ZHAN, M. GONG a L. ZHANG. Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction. *Construction and Building Materials*. 2019, 208, 350-360. ISSN 0950-0618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.171.

## 9 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

Články v kategorii  $J_{imp}$ :

- [1] NESPĚŠNÝ, O., PĚNČÍK, J., BEČKOVSKÝ, D., VYSTRČIL, J. a ŠUHAJDA, K. Determination of material and elasticity constants of cement fibre boards to extend field of application, *Construction and Building Materials*, Vol. 306, 2021, 124821, ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124821.
- [2] JUN, D., NESPĚŠNÝ, O., PĚNČÍK, J., FIŠAROVÁ, Z. a RUBINA, A. Optimized method for Helmholtz resonator design formed by perforated boards, *Applied Acoustics*, Vol. 184, 2021, 108341, ISSN 0003-682X. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108341.
- [3] ČÁKYOVÁ, K., VERTAĽ, M., VYSTRČIL, J., NESPĚŠNÝ, O., BEČKOVSKÝ, D., RUBINA, A., PĚNČÍK, J. a VRANAYOVÁ, Z. The Synergy of Living and Water Wall in Indoor Environment – Case Study in City of Brno, Czech Republic. *Sustainability*, 2021, 13, 11649. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su132111649.
- [4] MACHOVÁ, D., OBERLE, A., ZÁRYBNICKÁ, L., DOHNAL, J., ŠEDA, V., DÖMÉNY, J., VACENOVSKÁ, V., KLOIBER, M., PĚNČÍK, J., TIPPNER, J. a ČERMÁK, Petr. Surface Characteristics of One-Sided Charred Beech Wood. *Polymers* 2021, 13, 1551. doi: 10.3390/polym13101551.

- [5] STRUHALA, K., STRÁNSKÁ, Z., PĚNČÍK, J. a MATĚJKA, L. Environmental assessment of thermal insulation composite material. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2014. 19(12), s. 1908-1918. ISSN 0948-3349. doi: 10.1007/s11367-014-0796-0.
- [6] DOSTÁLOVÁ, D., KAFKA, V., VOKOUN, D., HELLER, L., MATĚJKA, L., KADEŘÁVEK, L. a PĚNČÍK, J. Thermomechanical Properties of Polypropylene-Based Lightweight Composites Modeled on the Mesoscale. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, vol. 26, p.5166–5172. ISSN 1059-9495. doi:10.1007/s11665-017-2967-1
- [7] LAVICKÝ, M., PĚNČÍK, J., DOHNAL, J., BEČKOVSKÝ, D. a BEČKOVSKÁ, T. Static numeric and experimental analysis of prefabricated winder wooden staircase with central stringer made from Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.). *WOOD RESEARCH*, 2016, vol. 61, no. 4, p. 553-564. ISSN 1336-4561.
- [8] BEČKOVSKÝ, D., VACKOVÁ, L., BEČKOVSKÁ, T., SOBOTKA, J., PĚNČÍK, J. a LAVICKÝ, M. Analysis of the diffusional properties of peripheral walls of wooden houses during EMW radiation exposure. *WOOD RESEARCH*, 2016, vol. 61, no. 4, p. 627-636. ISSN 1336-4561.
- [9] PĚNČÍK, J. Modelling of Experimental Tests of Wooden Specimens from Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with the Help of Anisotropic Plasticity Material Model. *Drvna industrija*. 2015. 66(1). s. 27-33. ISSN 0012-6772. doi: 10.5552/drind.2015.1362.
- [10] PĚNČÍK, J., LAVICKÝ, M., KRÁL, P. a HAVÍŘOVÁ, Z. Analysis of Behaviour of Prefabricated Staircases with One-Sided Suspended Stairs. *Drvna industrija*, 2015, vol. 66, no. 2, p. 147-156. ISSN 0012-6772. doi: 10.5552/drind.2015.1338.
- [11] PĚNČÍK, J. Analysis of support of stairs in a wooden prefabricated staircase with one-sided suspended stairs made from scots pine (*Pinus sylvestris*) with the use of experimental tests and numerical analyses. *WOOD RESEARCH*, 2015, vol. 60, no. 3, p. 477-490. ISSN 1336-4561.
- [12] PĚNČÍK, J. Material nonlinear analysis of plane structures made of cement based composite materials using the ANSYS system. *Engineering Transaction*. 2004, 52, 1-2, p. 71-90. ISSN 0867-888X. doi: 10.24423/engtrans.470.2004.

Články v kategorii J (v databázi WOS či SCOPUS):

- [13] ŠUHAJDOVÁ, E., NOVOTNÝ, M., PĚNČÍK, J., ŠUHAJDA, K., SCHMID, P. a STRAKA, B. Evaluation of Suitability of Selected Hardwood in Civil Engineering. *Građevinski materijali i konstrukcije*, 2018, roč. 2018, č. 2, s. 73-82. ISSN 2217-8139. doi:10.5937/GRMK1802073S.
- [14] SRNEC, R., PĚNČÍK, J., STAŇKOVÁ, L.; NEČASOVÁ, A., KRBEK, M. a NEČAS, A. Mechanical Testing of Tendons Sutured with Newly Developed Biomaterial. *Acta Chirurgie Orthopaedicae et Traumatologie Českoslovaca*, 2020, roč. 2020, č. 3, s. 210-214. ISSN 0001-5415. PMID: 32773023.
- [15] SRNEC, R., FEDOROVÁ, P., PĚNČÍK, J., VOJTOVÁ, L., SEDLINSKÁ, M. a NEČAS, A. Ex vivo testování mechanických vlastností metakarpálních/metatarzálních kostí psů po simulovaném vyjmutí implantátů. *Acta Chirurgie Orthopaedicae et Traumatologie Českoslovaca*, 2016, roč. 83, č. 2, s. 111-116. ISSN 0001-5415. PMID: 27167416.
- [16] FEDOROVÁ, P., SRNEC, R., PĚNČÍK, J., DVOŘÁK, M., KRBEK, M. a NEČAS, A. Intraartikulární augmentace parciální ruptury předního zkříženého vazy (ACL) nově vyvinutým UHMWPE biomateriálem v kombinaci s Hexalon AC L/PCL šrouby: ex vivo mechanické testování animálního modelu k. *Acta Chirurgie Orthopaedicae et Traumatologie Českoslovaca*, 2015, roč. 82, č. 3, s. 222-228. ISSN 0001-5415.

Články v kategorii J<sub>ost</sub>:

- [17] NESPĚŠNÝ, O., JUN, D., PĚNČÍK, J. a FIŠAROVÁ, Z. Stanovení zvukové pohltivosti Helmholtzových rezonátorů metodou přenosové matice. *TZB-info*. 2021, 2021, 26.3.2021, s. 1-6. ISSN 1801-4399.

- [18] ŠUHAJDOVÁ, E., NOVOTNÝ, M., PĚNČÍK, J. a ŠUHAJDA, K. Multikriteriální analýza vhodnosti užití vybraných druhů dřeva pro konstrukční účely. *TZB-info*, 2018, roč. 2018, 8.1.2018, s. 1-8. ISSN: 1801-4399.
- [19] DOHNAL, J. a PĚNČÍK, J. Analýza vlivu elektromagnetických vln na vysychání dřeva a na rozložení vlhkostního pole. *TZB-info*, 2018, č. 30.4.2018, s. 1-8. ISSN: 1801-4399.
- [20] SELNÍK, P., NEČADOVÁ, K., BEČKOVSKÝ, D. a PĚNČÍK, J. Retenční schopnosti testovacích segmentů zelených střech. *TZB-info*. 2016, roč. 2016, č. 5.12.2016, s. 1-6. ISSN 1801-4399.
- [21] STRUHALA, K., MATĚJKA, L., STRÁNSKÁ, Z., MATĚJKA, L. a PĚNČÍK, J. Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 3. díl. *Časopis Stavebnictví*. 2014, VIII, 06-07/2014, s. 39-41. ISSN 1802-2030.
- [22] STRUHALA, K., MATĚJKA, L., STRÁNSKÁ, Z., MATĚJKA, L. a PĚNČÍK, J. Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 2. díl. *Časopis Stavebnictví*. 2014, VIII, 05/2014, s. 30-34. ISSN 1802-2030.
- [23] STRUHALA, K., MATĚJKA, L., STRÁNSKÁ, Z., MATĚJKA, L. a PĚNČÍK, J. Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 1. díl. *Časopis Stavebnictví*. 2014, VIII, 04/2014, s. 40-44. ISSN 1802-2030.
- [24] PĚNČÍK, J. Modelování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu s kritérii porušení. *Stavební obzor*. 2014, 2014, 1-2, s. 4-10. ISSN 1210-4027.
- [25] ŠAGÁT, E., PĚNČÍK, J. a MATĚJKA, L. Parametrická studie vlivu tloušťky vzduchové mezery provětrávané fasády. *Stavební obzor*. 2013, 2013, 8, s. 197-201. ISSN 1210-4027.
- [26] PĚNČÍK, J., LAVICKÝ, M. a HAVÍŘOVÁ, Z. Využití metody numerického modelování při identifikaci kritických míst segmentového schodiště s jednostranně zavěšenými stupni. *Stavební partner. E-magazín*. 2013, II, 3. s. 1-4. ISSN 1805-5958.
- [27] PĚNČÍK, J. a LAVICKÝ, M. Matematické modelování a experimentální testy pro navrhování moderních schodišť. *Časopis Stavebnictví*. 2011, V, 09/2011, s. 42-47. ISSN 1802-2030.
- [28] MATĚJKA, L., PĚNČÍK, J., KRÁLOVÁ, M., KALUŽOVÁ, A., MATĚJKA, L. a POSPÍŠIL, T. Thermal Insulation Composite Material Based on Thermal Insulation Composite Material Based on Polymers – Determination of Water Absorption. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2013. 35(2). p. 1141-1146. ISSN 1701-8285.
- [29] KALUŽOVÁ, A., PĚNČÍK, J., MATĚJKA, L., MATĚJKA, L., POSPÍŠIL, T. Thermal Insulation Composite Material Based on Polymers - Determination of Thermal Conductivity. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2013. 2013. 35(2). p. 1176-1180 ISSN 1701-8285.



## ABSTRACT

The field of Civil Engineering is a complex field in which theoretical developments in designing structural elements are combined with knowledge from other fields and specializations, such as the knowledge of building structure statics, testing of building materials, experimental verification of the load bearing capacity of structural elements, and structural details.

One of the relevant areas is designing support structures of staircase located inside building. This is an actual issue as stairs are an essential part of all multi-story structures in a wide range of residential, public, and industrial buildings, and it is also relevant from the perspective of using new materials and modern approaches and technologies used in their construction.

When designing staircase support structures, it is necessary to focus mainly on static requirements, so that the requirements for mechanical resistance and stability are met regardless of the used material. The support structure of a staircase must be stable and must transfer all permanent and occasional loads imposed on the staircase during construction and its service life.

The design of a staircase structure always begins with its type of support and the used material. The design is primarily produced according to standard regulations, often with the use of software based on the finite element method. For a more precise design and determination of behaviour of individual structural parts, it is advisable to use geometrically non-idealized analyses models that include a refined description of interconnection of structural elements, taking into account potential contact connections and using material models within the analysis that allow for a description of non-linear behaviour of the material until its failure. Algorithms that predict material failure are also used. This approach has been verified for wooden staircases.

It is advisable and useful to extend and complement the numerical design of new types of staircases supporting structures with theoretical validation performed by numerical analyses with experimental validation in laboratory conditions. This approach is also allowed by standard regulations.

The experimental verification can be performed using loading tests. They use the semi scale model and material similarity with reduced scale models or sectional models in a 1:1 scale or a real structure in a 1:1 scale, i.e. a full-scale experiment.

The combination of numerical modelling and experimental testing, or verification of the global behaviour of the structure using sectional models in 1:1 scale or full-scale experiments, was presented on an example of wooden staircase designs, i.e. a segmental staircase with single-sided suspended stairs without a wall stringer, a segmental winder staircase with central stringer, and a segmental cantilever staircase with single-sided suspended steps without an external stringer. The approach was also used for cement fibre material in the form of boards (CFB) for staircase stringer and all other structure parts. The last area of applying described approach, and also a future development area, is the use of additive technology or 3D printing for the designing of staircases.