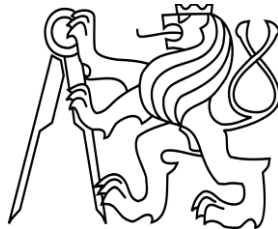


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

POKROČILÝ NÁVRH SPOJŮ S OCELOVÝMI PRVKY V DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍCH

ADVANCED DESIGN OF JOINTS WITH STEEL ELEMENTS IN TIMBER
STRUCTURES

Bc. Kristýna Vopatová

vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vopatová** Jméno: **Kristýna** Osobní číslo: **423674**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Integrální bezpečnost staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Pokročilý návrh spojů s ocelovými prvky v dřevěných konstrukcích

Název diplomové práce anglicky:

Advanced design of joints with steel elements in timber structures

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. František Wald, CSc., katedra ocelových a dřevěných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **03.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

prof. Ing. František Wald, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, autorský zákon, nemám námitek.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce, prof. Ing. Františkovi Waldovi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady v průběhu zpracování této diplomové práce.

Děkuji Ing. Kamile Cábové, Ph.D., Ing. Břetislavovi Židlickému a Ing. Martě Kuřikové, Ph.D. za jejich názory, ochotu, cenné rady a za spolupráci během příprav experimentů. Dále za možnost účastnit se zpracování projektu TJ01000315, vzniklého za podpory grantu vypsaneho Technologickou agenturou ČR.

Poděkování patří hlavně mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Čestné prohlášení	II
Poděkování	III
Abstrakt	VI
Abstract	VI
Seznam použitých symbolů a zkratk	VII
1 Úvod	9
2 Cíle práce	10
2.1 Analytický model	10
2.2 Numerický model.....	10
2.3 Návrh a příprava experimentů pro validaci numerického modelu.....	10
3 Současný stav poznání	11
3.1 Spoje dřevěných konstrukcí	11
3.2 Svorníky	15
3.3 Realizace spojů se styčnickovými plechy	15
3.4 Poruchy konstrukcí	18
3.5 Návrh spoje ocel-dřevo se svorníky	18
3.5.1 Únosnost spoje	19
3.5.2 Svorníkové spoje – příčně zatížené svorníky	20
3.5.3 Porušení spoje blokovým smykem a zátkovým smykem	21
3.5.4 Výpočet únosnosti víceřizných spojů ocel-dřevo	24
3.5.5 Porušení spoje otláčením dřevěného prvku	26
3.6 Publikované experimenty	30
3.7 Problematika numerického modelování.....	40
3.7.1 Metoda konečných prvků	40
3.7.2 Materiálové modely	40
3.7.3 Pružný materiálový model	40
3.7.4 Ortotropní elasticita dřeva.....	42
3.7.5 Materiálová nelinearita	44
3.7.6 Pružně-plastický materiálový model dřeva	45
4 Analytický model	46
4.1 Zjednodušený analytický model	46
4.2 Analytický model spoje	49
5 Numerický model	51
5.1 Numerický model spoje	52
5.1.1 Geometrie spoje	52
5.1.2 Materiálové vlastnosti	54
5.1.3 Zatížení.....	57
5.1.4 Kontaktní vazby	60
5.1.5 Výpočetní síť.....	63
5.2 Zjednodušený numerický model	66

5.2.1	Popis zjednodušeného modelu	66
5.2.2	Verifikace zjednodušeného modelu	66
6	Verifikace numerického modelu	72
7	Příprava experimentů	78
7.1	Zkušební zařízení	78
7.2	Popis vzorků	79
7.3	Schéma experimentu	83
7.4	Materiálové parametry	87
7.5	Experimentální metody	89
7.5.1	Stanovení vlhkosti zkušebního tělesa	89
7.5.2	Kondicionování zkušebních těles	91
7.5.3	Hustota dřeva	91
7.5.4	Stanovení modulu pružnosti a pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny	91
7.5.5	Požadavky na průběh zkoušek	92
7.6	Měřicí zařízení	94
8	Závěr	96
	Literatura	98
	Seznam použitých programů	102
	Příloha: Pilotní zkouška	

Abstrakt

Práce je zaměřena na návrh dřevěných spojů s vkládanými ocelovými plechy. V úvodu je řešena aktuálnost problematiky a jsou stanoveny cíle práce. Je popsána problematika návrhu spojů se zaměřením na specifika spojů s vnitřní ocelovou deskou a nejčastější způsoby porušení. Jsou popsány postupy stanovení únosnosti řešených spojů. Další kapitola se zabývá numerickým modelováním svorníkového spoje dřevěné konstrukce. Práce obsahuje analytický výpočet únosnosti v souladu s návrhovými normami ČSN EN. Část práce je věnována verifikaci numerického modelu na analytickém. V práci jsou provedeny experimenty dřevěných spojů s ocelovými plechy spojenými svorníkovými spojovacími prostředky. Je specifikována geometrie vzorků a navržen průběh zkoušek vzorků vystavených tahu.

Klíčová slova

Dřevo; dřevěná konstrukce; spoj; ocelový plech; experiment; numerický model

Abstract

The thesis is focused on designing timber joints with inserted steel sheets. In the introduction is solved topicality of issue and it is appointed the aim of this work. The thesis describes design of joints with the inner steel plate and failure modes. The design for resistance described in detail. The next chapter deals with numerical modelling of the bolted joint of the timber structure. The analytical model is prepared according to the standards ČSN EN. Part of the work is dedicated to verification of the FEA model to the analytical one. In the work is prepared an experimental study. The chapter about preparation of experimental tests specifies the geometry of the proposed experimental samples and suggests the course of experimental tests to track the behaviour of joints loaded in tensioning.

Keywords

Timber; timber structure; joint; steel plate; experiment; numerical model

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	plocha	m^2
c	měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
d	průměr spojovacího prostředku	mm
$F_{v,Rk}$	charakteristická únosnost spojovacího prostředku	N
$f_{h,1,k}$	charakteristická pevnost v otláčení ve dřevěném prvku	N/mm^2
t	tloušťka prvku nebo hloubka vniku	mm
$M_{y,Rk}$	char. plastický moment únosnosti spojovacího prostředku	$N \cdot mm$
$F_{ax,Rk}$	char. únosnost na vytažení spojovacího prostředku	N
$M_{y,Rk}$	char. hodnota plastického momentu únosnosti	$N \cdot mm$
$f_{u,k}$	char. pevnost v tahu	N/mm^2
$f_{h,0,k}$	char. pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny	N/mm^2
$f_{t,0,k}$	char. pevnost v tahu dřevěného prvku	N/mm^2
$f_{v,k}$	char. pevnost ve smyku dřevěného prvku	N/mm^2
$f_{h,k}$	char. pevnost v otláčení dřevěného prvku	N/mm^2
k_{90}	součinitel dřevěného prvku	–
a	rozteče a vzdálenosti svorníků od konců/okrajů	mm
n	počet svorníků v řadě	–
n_{ef}	účinný počet svorníků v řadě	–
$F_{bs,Rk}$	char. únosnost při blokovém nebo zátkovém smyku	N
$A_{net,t}$	čistá průřezová plocha kolmo k vláknům	mm^2
$A_{net,v}$	čistá smyková plocha rovnoběžná se směrem vláken	mm^2
$L_{net,t}$	čistá šířka průřezu kolmo k vláknům	mm
$L_{net,v}$	celková čistá délka plochy smykového lomu	mm
R_k	char. únosnost spoje	N
l	délka	mm
Δl	změna délky tělesa	mm

m_1	hmotnost zkušebního tělesa před sušením	kg
m_0	hmotnost vysušeného zkušebního tělesa	kg
Q	hustota dřeva	kg/m ³
E	Youngův modul pružnosti	MPa
ν	Poissonova konstanta	-
G	modul pružnosti ve smyku	MPa

Řecké symboly

λ	součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
α	úhel zatížení vzhledem k vláknům	°
ρ	objemová hmotnost	kg/m ³
σ	Stephan-Boltzmannova konstanta	W/m ⁴ K ²
ω	vlhkost dřevěného prvku	%

Zkratky

BSB	Blumer-System-Binder
MKD	Multi-Krallen-Dübeln
MNC	Multiple-Nail-Connectors
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT
GANG-NAIL	typ spoje s vnější ocelovou deskou s prolisovanými trny

1 Úvod

Dřevěné nosné konstrukce sestávají z prvků a jejich spojů. Pro spojování dřevěných konstrukcí se využívá téměř nekonečné množství konstrukčních řešení. Spoje zajišťují celistvost konstrukce a přenáší vnitřní síly vyvolané vnějším zatížením z jednoho spojovaného prvku na druhý. Spoj nemá být nejslabším místem celé konstrukce a jeho selhání obvykle vede k selhání celé soustavy. Chování spojů ovlivňuje řada faktorů, jako vlastnosti materiálů, geometrie a spolupůsobení prvků.

Práce se zabývá spoji s vkládanými ocelovými plechy, které mají oproti klasickým spojům výrazně vyšší únosnost. Jsou vhodné pro návrh výrazně namáhaných konstrukcí ze dřeva např. na velká rozpětí. Takové spojení je označováno jako spoj typu ocel-dřevo a využívá se zde vyšší pevnosti oceli oproti dřevu.

2 Cíle práce

Cílem práce je příprava pokročilého vědeckého modelu metodou konečných prvků styčnicku dřevěných prvků s ocelovými plechy při namáhání tahovou silou.

Dílčími cíli je shromáždit znalosti o návrhu spojů, verifikace vědeckého modelu MKP na analytických modelech. Bude připravena studie pro přípravu na experimentální ověření modelu.

2.1 Analytický model

Zjednodušený analytický model bude vytvořen s uvažováním lineárně elastických vlastností dřeva podle Hookova zákona. Analytický model spoje bude verifikován na modelu podle návrhové normy ČSN EN 1995-1-1:2007.

2.2 Numerický model

Výstupem diplomové práce bude vědecký numerický model vytvořený metodou konečných prvků. Model zohlední anizotropii dřevěného prvku. Vzájemné interakce jednotlivých prvků ve spoji budou definovány kontakty povrchů. Model bude verifikován analytickým modelem s lineárním popisem materiálu.

2.3 Návrh a příprava experimentů pro validaci numerického modelu

Dílčím cílem práce je příprava podkladů pro zkoušky spojů s vkládanými ocelovými plechy spojených svorníkovými spojovacími prostředky. Při zkoušení styčnicku v tahu budou sledovány deformace vzorků od tahového namáhání a vlivu vzájemného působení jednotlivých prvků vzorku při zatěžování řízeném deformacemi. Bude navržena řada vzorků s proměnou rozměrů a materiálových vlastností dřevěných a ocelových prvků spoje. Validace numerické simulace a analytického modelu povede ke zpřesnění popisu chování spojů.

3 Současný stav poznání

Nosnou soustavu dřevěných konstrukcí klasicky tvoří pruty z rostlého nebo lepeného dřeva. V současné době se stále častěji využívají také plošné deskostěnové a skořepinové prvky z materiálů na bázi dřeva, vyrobené obvykle z překližek, dřevotřískových desek nebo křížem vrstvených desek [1].

Návrh dřevěné konstrukce musí vyhovovat mezním stavům únosnosti i mezním stavům použitelnosti. Pro splnění použitelnosti a trvanlivosti je důležitý správný návrh spojů konstrukčních prvků [2]. U hal velkých rozpětí bývá příčinou selhání konstrukce porušení mechanických spojů kolíkového typu v přípojích, stycích a uložení. Styčníky mohou být nejslabší článek konstrukčního systému a je třeba jim věnovat při navrhování pozornost [3].

3.1 Spoje dřevěných konstrukcí

Spoje dřevěných prvků se navrhují jako tesařské spoje, mechanické spoje dřeva a nejnovějším způsobem jsou spoje lepené.

Princip návrhu nosných dřevěných konstrukcí lze rozdělit na dvě části

1. Výpočet vnitřních sil a přetvoření konstrukce
2. Návrh a posouzení dimenzí jednotlivých prvků a spojů pomocí zjištěných vnitřních sil a přetvoření

Návrh musí splňovat požadavky příslušné normy. Při nedodržení daných podmínek jsou nutné úpravy konstrukčního systému, jako jsou změna návrhu průřezu nevyhovujících prvků, zvolení jiné pevnostní třídy dřeva nebo změna geometrie spojů. Vnitřní síly a deformace se poté stanoví pro novou konstrukci, která již bude vyhovovat normovým podmínkám. Za únosnou se konstrukce považuje, pokud každý z jednotlivých prvků a spojů splňuje mezní stav únosnosti [3]. Existuje celá řada publikací s uvedenými podrobnějšími postupy návrhu a posudky dřevěných konstrukcí. V případě použití pravděpodobnostního přístupu se pro výpočet vnitřních sil prutových prvků a konstrukcí využívá nejčastěji softwaru založeného na metodě konečných prvků [4].

Porušení spoje může být vzhledem ke složitému prostorovému namáhání zapříčiněno několika různými způsoby porušení současně. Jedná se o problém zejména u konstrukcí s více spojovacími prostředky současně, u kterých není v současné době přesně zdokumentováno chování takových spojů při vysokém namáhání. Důvodem je vysoká technická a finanční náročnost experimentální analýzy. Předpokládá se proto ideální pružně plastické chování dřeva, které nezohledňuje možnost křehkého porušení, zejména rozštěpení nebo blokového smykového porušení dřeva [3].

Pro zvýšení únosnosti prostorových soustav na velká rozpětí se navrhuje kombinace dřeva s dalšími stavebními materiály a využívá se výhodných pevnostních a konstrukčních vlastností jednotlivých materiálů. Stále častěji se navrhuje spoje s vkládanými ocelovými elementy, označované jako spoje typu ocel-dřevo. Zde vyšší pevnost ocelových prvků výrazně přispívá k přenosu sil mezi připojovanými dřevěnými prvky nosné soustavy. Mezi nejvíce rozšířená patří řešení pomocí vnějších zalisovaných styčnickových desek, viz obr. 1. Další nejčastější možností je spojování pomocí ocelových styčnickových plechů nebo složitějších elementů, které jsou vkládány do dřevěných profilů, viz obr. 2. Spoje s vkládanými styčnickovými plechy do dřeva vykazují vyšší únosnost a také vyšší požární odolnost, což umožňuje pohledově příznat nosnou konstrukci i v objektech určených pro shromažďování osob [1].



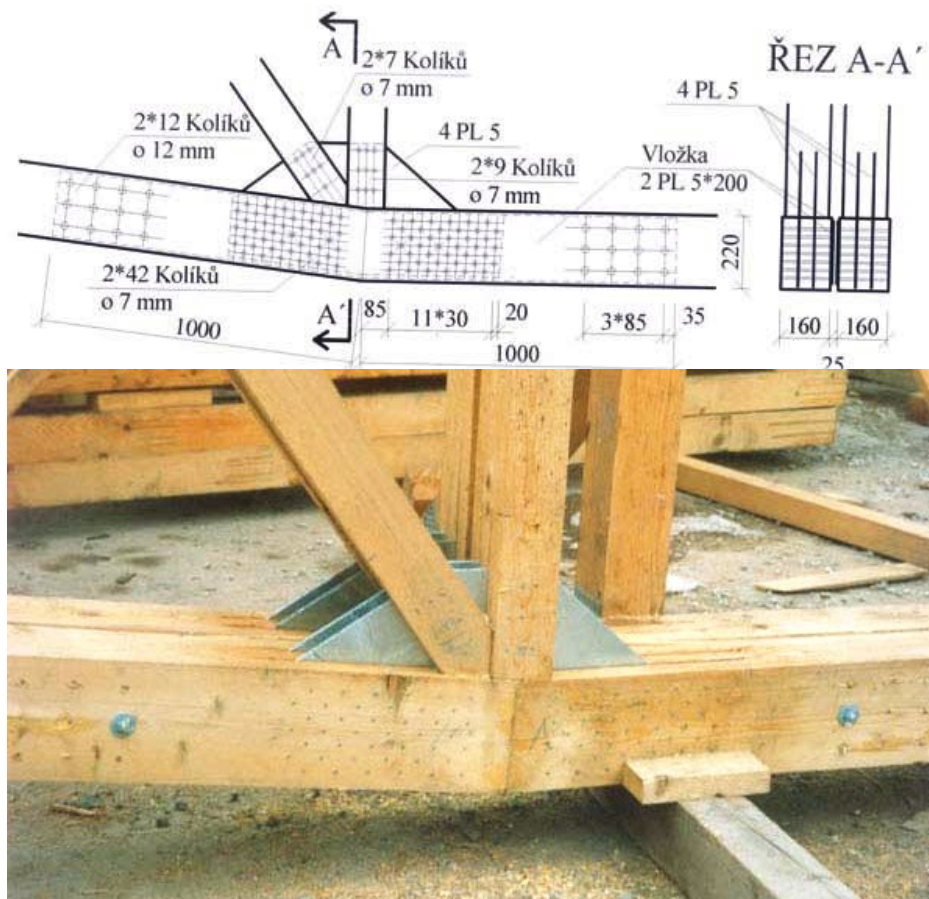
obr. 1 Charakteristický styčník systému GANG-NAIL [5]

V oblasti spojů s vkládanými ocelovými plechy došlo v posledních letech k vývoji nových konstrukčních systémů pro umožnění nejružnější variability geometrie spoje, viz obr. 3. Nejčastěji navrhovanými systémy jsou efektivní konstrukční systémy BSB¹ (Blumer-System-Binder), MKD² (Multi-Krallen-Dübeln), MNC³ (Multiple Nail Connectors) a další. Nejprogresivnějším a perspektivním spojovacím systémem je v současné době WS systém firmy SFS intec, se samovrtnými vruty jako spojovacími prostředky. Mezi jejich největší výhody patří umožnění rychlé montáže vrutů bez předvrtávání otvorů do dřeva a styčnickových plechů [6]. Dalšími typy spojů s vkládanými ocelovými prvky jsou systémy Greimbau, které se skládají z tenkých ocelových plechů a jako spojovací prostředek se používají hřebíky [7].

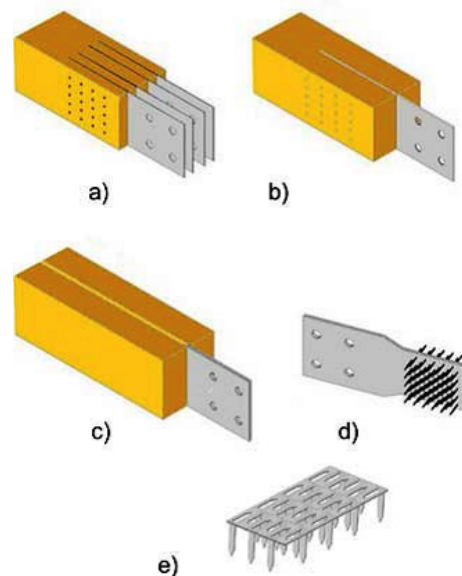
¹ BSB - Blumer-System-Binder – systém s vloženým ocelovým plechem a malopřůměrovými kolíky

² MKD - Multi-Krallen-Dübel – dřevěné prvky jsou nalísovány na styčnickové desky s oboustranně přivařenými ocelovými trny

³ MNC - Multiple Nail Connectors - spojovací desky s vícenásobnými hřebíky vyvinuté pro příhradové nosníky z vrstveného dřeva KERTO



obr. 2 Spoj s vkládanými ocelovými plechy v místě zalomení dolního pásu vazníku: (horní část) nákras; (dolní část) fotografie skutečného provedení [1]



obr. 3 Typy spojů dřevěných konstrukcí s ocelovými styčnickovými plechy

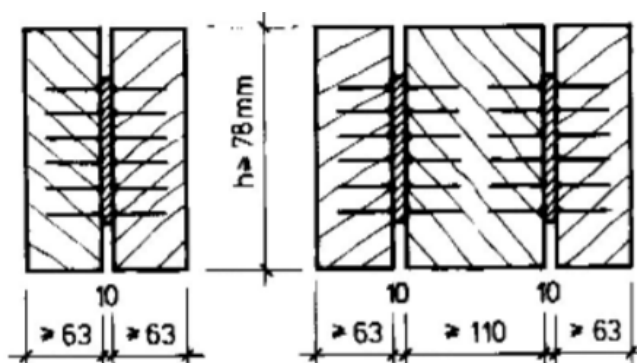
a/ hřebíkový spoj s tenkými ocelovými plechy tloušťky 1 až 2 mm, b/ spoj s ocelovými kolíky a jedním plechem tloušťky 5 až 10 mm, c/ spoj typu MKD s navařenými trny, d/ deska typu MKD s navařenými trny, e/ styčnicková deska s prolisovanými trny [1]

Velmi rozšířeným typem spojení je systém BSB. Vyznačuje se spojením s plechem větší tloušťky a s kolíky malého průměru viz obr. 4.



obr. 4 Charakteristický spoj konstrukcí BSB [6]

V případě spoje MKD jsou dřevěné prvky spojeny pomocí spojovacích desek tvořených 10 mm tlustými ocelovými styčnickovými plechy s oboustranně navařenými obdélníkovými hřeby dl. 50 mm v předepsaných roztečích. Vazníky jsou touto metodou vyráběny na speciálním lisovacím zařízení zalisováním spojovací desky MKD mezi dvě, popřípadě tři vrstvy dřevěných částí, viz obr. 5. V porovnání se systémem Gang-nail⁴ má systém MKD řadu výhod. Velkou výhodou těchto spojů je neviditelnost spojovacích prostředků, maximální rozpětí není omezeno na 30 m jako u Gang-nail a vykazují výrazně vyšší požární odolnosti [8].



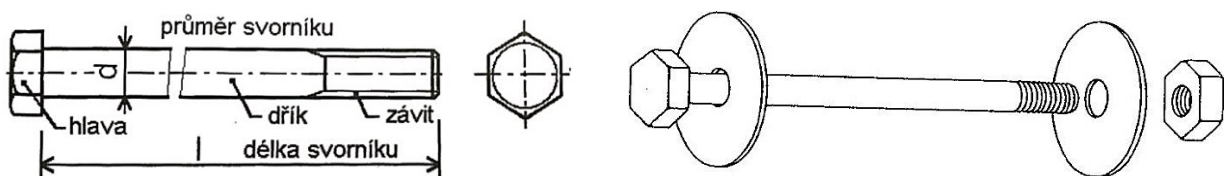
obr. 5 Schéma zalisování ocelových desek MKD: (vlevo) mezi dva dřevěné prvky; (vpravo) mezi tři dřevěné prvky [8]

K novodobým druhům ztužení silně namáhaných spojů a při sanacích narušených dřevěných konstrukcí se v praxi stále častěji využívají technologie vlepování prutů do dřeva pomocí epoxidových a polyuretanových lepidel. Principem tohoto spoje je vlepení ocelových nebo kompozitních tyčových prutů do rostlého i lepeného lamelového dřeva na taženou stranu nosníků. Výztužným prvkem může být i zpevňující fólie, kterou je doporučeno chránit krycím prvkem [9].

⁴ GANG-NAIL – označení pro typ spoje s vnější ocelovou deskou s prolisovanými trny

3.2 Svorníky

Svorníky jsou spojovací prostředky kruhového průřezu, obr. 6, které jsou na jednom konci zakončeny šestihrannou nebo čtvercovou hlavou a na druhém konci závitem a maticí, případně mají na obou koncích závit a matici. Svorníky se užívají společně s ocelovými podložkami, jejichž délka strany popř. průměr má být nejméně $3d$ a tloušťka nejméně $0,3d$, viz obr. 6. Svorníky se často navrhují do dřevěných spojů, které mají tendenci se během zatěžování rozevírat. Do dřevěných spojovaných prvků se zpravidla předvrtají otvory, které smí být o 1 mm větší než je průměr svorníku a poté se utahují takovým způsobem, aby prvky byly v těsném kontaktu. Je-li svorník zaražen do otvoru dřevěného prvku stejného jako je průměr svorníku, poté svorník působí stejně jako kolík a mohou se použít pravidla pro navrhování spoje s kolíky. Pro kolíkové spoje se otvory předvrtávají s jmenovitým průměrem, v případě užití ocelového plechu se otvory smí předvrtat o 1 mm větší než je průměr kolíku a případné deformace musí být přiměřeně uváženy. Jedná se poté o těsný svorníkový spoj [2]. Tyto kolíkové spojovací prostředky zajišťují spojení prvků zejména ve spojích s vnějšími ocelovými plechy a zároveň jsou schopné přenášet tahové síly v ose svorníku. V kolíkových spojích se doporučuje, aby byl alespoň každý šestý spojovací prostředek svorník. Na rozdíl od kolíků, které se používají i v dřevěné variantě, bývají svorníky zhotovené výhradně z oceli. Svorníky se zhotovují průměru 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 a 30 mm a zhotovují se z oceli 3.6, 4.6, 4.8, 5.6 a 8.8 [10]. K účinnému roznesení namáhání v tažených spojích se spojovací prostředky navrhují v rovnoběžných řadách a sloupcích [3].



obr. 6 (vlevo) Schéma svorníku; (vpravo) Ocelový svorník s podložkou a maticí [11]

3.3 Realizace spojů se styčnickými plechy

Spoje s vkládanými ocelovými plechy již byly navrženy ve více stavbách, kde klasické typy spojů nezajišťovaly dostatečnou únosnost. Na území České republiky byly již realizovány desítky staveb, jako příklad jsou uvedeny čtyři konstrukce rozpětí 40-59,5 m se spoji na bázi vkládaných styčnickových plechů s použitím hřebíkových a kolíkových spojovacích prostředků. Jednalo se o dvě halové konstrukce ve Frýdlantu nad Ostravicí na rozpětí 40,5 a 24,4 m. Později byla zprovozněna sportovní hala v Bílovci o rozpětí 59,5 m a zastřešení zimního stadionu ve Vrchlabí o rozpětí 40,4 m [6].

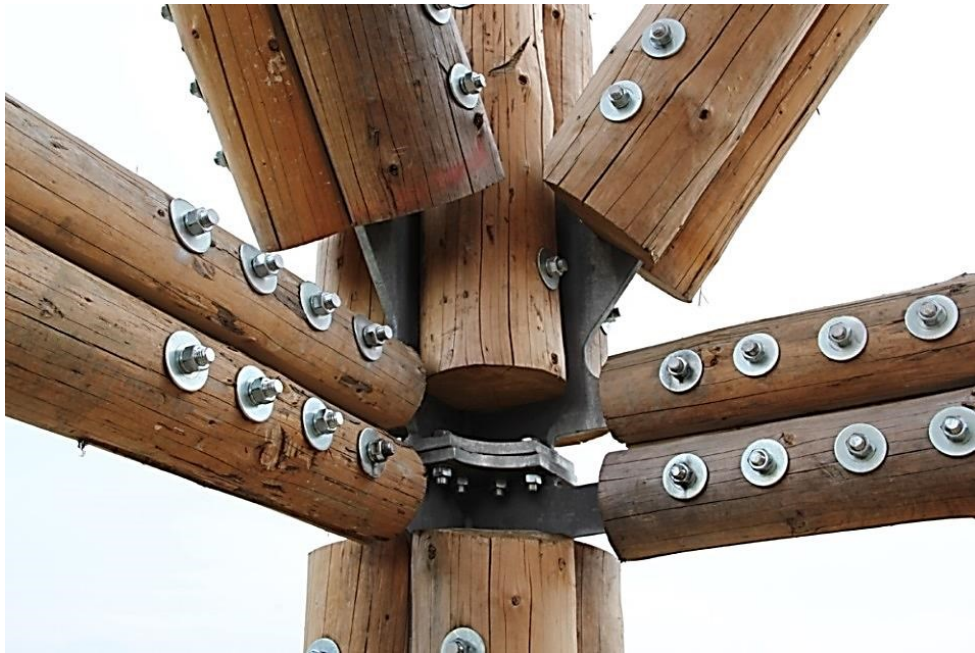
Na **konstrukci v Bílovci** jsou prováděna geodetická měření. Jsou sledovány zejména vertikální a horizontální posuny konstrukce v různých obdobích. Pomocí metody protínání úhlů bylo zjištěno, že konstrukce prošla procesem dotvarování a sesychání, což se projevilo změnou prostorové polohy sledovaných bodů vzhledem k základní etapě. Došlo také k prokluzům ve spojích, na které má velký vliv změna sezónních teplot [6].

V dřevěné **konstrukci bazénové haly v Brně-Kohoutovicích** (2010) jsou základními typy spojů taktéž spoje s vkládanými ocelovými plechy a s ocelovými tvarovými prvky. Jedná se o podporové detaily a montážní styky lepených rámových žeber segmentů a dále přípoje vazníků k lepeným žebrům a ocelovým stěnovým sloupům, obr. 7. Tvarované prvky vyrobené svařením plechů jsou použity pro přípoje vzpěrek k vaznicím, přípoje ocelových prutů podélných ztužidel k lepeným žebrům a další sekundární spoje [6].



obr. 7 Detail podepření zakřiveného rámu na betonovou konstrukci [6]

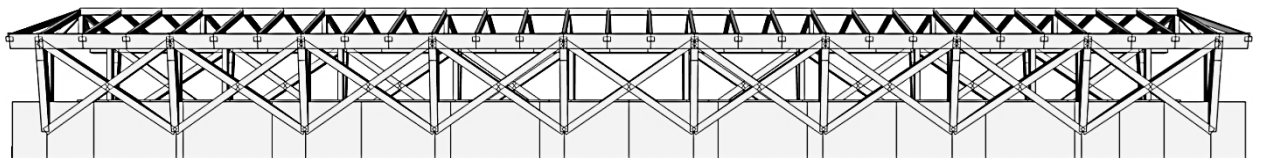
Spoje s vkládanými ocelovými prvky je možné použít i pro spojení dřevěných prvků z kulatiny. Příkladem takového spojení je konstrukce rozhledny **Bohdanka v obci Bohdaneč** u Zruče nad Sázavou. Spoje v konstrukci jsou zde výrazně namáhány osovými silami od silného zatížení větrem, které mají charakter střídavého dynamického zatížení. Na základě výsledků experimentů a dlouhodobých zkušeností zde byly navrženy spoje s vkládanými styčnickovými plechy a těsnými svorníky [6].



obr. 8 Charakteristický detail styčnicku rozhledny Bohdanka [12]

Proti vzniku trhlin jsou jednotlivé spojovací prvky zajištěny závitovými vruty. Kulatiny průměru přibližně 280 mm jsou v nejvíce namáhaném rohovém přípoji uchyceny do ocelového svařence, tvořeného plechem tl. 20 mm, viz obr. 8. Svorníky jsou do opracovaného rovného povrchu kulatiny upevněny v obou na sebe kolmých směrech v osových vzdálenostech 75 mm. Ve vnitřní části spoje jsou na sražené hrany kulatin zalisovány desky s prolisovanými trny [6].

Příkladem použití spoje s vkládanými ocelovými plechy je i konstrukce **dřevěné lávky v Brně** realizovaná v roce 2017, viz obr. 9. Lávka dosahuje rozpětí 26,1 m a je tvořena dvěma hlavními nosníky a příhradovou soustavou z lepeného lamelového dřeva [13].



obr. 9 Konstrukční schéma zastřešené lávky na rozpětí 26,1 m. Nosný systém lávky tvoří dva lepené hlavní nosníky a spolupůsobící příhradová soustava se zkříženými diagonálami [13]

Pro hlavní konstrukční detaily byly použity svorníkové spojovací prostředky, pro přípoje sekundárních nosných prvků a ocelových spojovacích elementů byly navrženy závitové vruty. Návrh spojů vycházel z výsledků získaných z experimentálního výzkumu spojů kolíkového typu a poznatků ze skutečného působení v již realizovaných konstrukcích. Při návrhu bylo nutné přihlídnout k dimenzím připojovaných dřevěných prvků, redukci únosnosti kolíkových spojů uspořádaných v několika řadách za sebou, k vlivu excentricit a přídavných napětí, k vlivu sesychání a bobtnání a k vlivu zátkového a blokového smyku. Typický přípoj příhradové soustavy s vkládanými styčnickovými plechy je zobrazen na obr. 10 [13].



obr. 10 Styčníky příhradové soustavy s vkládanými plechy [13]

3.4 Poruchy konstrukcí

Z výsledků experimentálních testů a zkušeností z průzkumů již realizovaných staveb vyplývá, že spoje s kolíkovými spojovacími prostředky typu ocel-dřevo a dřevo-dřevo splňují požadavky na únosnost, tuhost a použitelnost i při opakovaném a dynamickém namáhání. I přesto se mohou vyskytnout některé případy, kdy dochází k porušení v oblasti těchto spojů. Nejzávažnějšími poruchami bývají poruchy montážních spojů, kde často dochází k nedostatečné únosnosti navržených spojů, nedodržení stanovených roztečí mezi spojovacími prostředky a vzdáleností od okrajů dřeva, nekvalitní výrobě či montáži. Velký vliv na vznik trhlin v místě spojů má vlhkost obsažená ve dřevě při montáži konstrukce, která způsobuje sesychání a bobtnání dřeva [13].

3.5 Návrh spoje ocel-dřevo se svorníky

Obecný postup návrhu spojů typu ocel-dřevo je popsán v normě ČSN EN 1995-1-1 [14]. Základní poznatky pochází z publikací K. W. Johansena [15].

U jednostranných vkládaných nebo zalisovaných hmoždíků může docházet k počátečnímu prokluzu. U spojů se styčnickovými deskami s prolisovanými trny může docházet v závislosti na geometrických imperfekcích ke křehkému porušení, z důvodu malé kapacity pro plastické přetvoření [2].

3.5.1 Únosnost spoje

Únosnost spoje ocel-dřevo se stanovuje odlišně pro tenké a tlusté ocelové desky v závislosti na tloušťce ocelové desky t_s . Ocelové desky se dělí na tenké a tlusté podle vztahu

$$t_s \leq 0,5 d \rightarrow \text{tenká deska} \quad (1)$$

$$t_s \leq 1,0 d \rightarrow \text{tlustá deska}^* \quad \text{*tolerance rozměru maximálně } 0,1 d \quad (2)$$

kde t_s je tloušťka ocelové desky [mm];

d průměr spojovacího prostředku [mm].

Charakteristická únosnost spojů s tloušťkou ocelové desky mezi tenkou a tlustou deskou se má počítat pomocí lineární interpolace mezi limitními hodnotami pro tenkou a tlustou deskou [14].

Pro dvojstřížný spoj s vnitřní tlustou ocelovou deskou představuje charakteristická únosnost svorníků pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku nejmenší hodnotu stanovenou z následujícího vztahu [14]

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\} \quad (3)$$

kde $F_{v,Rk}$ je charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku [N];

$f_{h,1,k}$ charakteristická pevnost v otláčení ve dřevěném prvku [N/mm²];

t_1 menší tloušťka krajního dřevěného prvku nebo hloubka vniku [mm];

d průměr spojovacího prostředku [mm];

$M_{y,Rk}$ charakteristický plastický moment únosnosti spojovacího prostředku [Nmm];

$F_{ax,Rk}$ charakteristická únosnost na vytažení spojovacího prostředku [N].

Pro omezení účinků sepnutí $F_{ax,Rk}$ platí stejná pravidla jako pro spoje dřevo-dřevo a deska-dřevo. Příspěvek k únosnosti od účinku sepnutí spoje se má pro svorníky omezit na 25 % z Johansenovy⁵ části. U únosnosti na vytažení svorníků $F_{ax,Rk}$ se může uvážit odpor podložek. Osová únosnost a únosnost na vytažení svorníku se uvažuje jako menší hodnota z únosnosti svorníku v tahu nebo únosnost buď podložky, nebo ocelové desky pro spoje ocel-dřevo. Únosnost podložky se určuje, pokud charakteristická pevnost v tlaku na dotykové ploše je $3,0 f_{c,90,k}$. Musí se uvážit, že únosnost spojů ocel-dřevo se zatíženým koncem může být snížena v důsledku trhliny po obvodě skupiny spojovacích prostředků → porušení blokovým smykem a zátkovým smykem skupiny spojovacích prostředků [14].

⁵ Johansenova část vzorce – je v rovnici pro výpočet $F_{v,Rk}$ první člen na pravé straně

3.5.2 Svorníkové spoje – příčně zatížené svorníky

Plastický moment únosnosti se stanoví jako

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (4)$$

kde $M_{y,Rk}$ je charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti [Nmm];

$f_{u,k}$ charakteristická pevnost v tahu [N/mm²];

d průměr svorníku [mm].

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu pod úhlem α vzhledem k vláknům pro svorníky do průměru 30 mm je

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}\sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (5)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d)\rho_k \quad (6)$$

kde $f_{h,0,k}$ je charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny [N/mm²];

ρ_k charakteristická hustota dřeva [kg/m³];

α úhel zatížení vzhledem k vláknům [°];

d průměr svorníku [mm];

k_{90} součinitel dle tabulky.

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 d & \text{pro dřevo jehličnatých dřevin} \\ 1,30 + 0,015 d & \text{pro LVL} \\ 0,90 + 0,015 d & \text{pro dřevo listnatých dřevin} \end{cases} \quad (7)$$

Pro bezpečný návrh spoje je nutné dodržet doporučené rozteče a vzdálenosti od konců a okrajů spojovaných dřevěných prvků. Nejmenší osové vzdálenosti svorníků stanovené podle ČSN EN 1995-1-1:2007 [14] jsou uvedeny v tab. 1 a znázorněny na obr. 11.

tab. 1 Minimální hodnoty roztečí a vzdáleností svorníků od konců a okrajů [14]

Rozteče a vzdálenosti od konců/okrajů (viz obrázek 8.7)	Úhel	Minimální rozteče nebo vzdálenosti
a_1 (rovnoběžně s vlákny)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) d$
a_2 (kolmo k vláknům)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4 d$
$a_{3,t}$ (zatížený konec)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7 d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (nezatížený konec)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$\max[(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d]$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$4 d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max[(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d]$
$a_{4,t}$ (zatížený okraj)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2 \sin \alpha) d; 3d]$
$a_{4,c}$ (nezatížený okraj)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 d$

Pro jednu řadu tvořenou n svorníky rovnoběžně se směrem vláken, se má únosnost rovnoběžně s vlákny vypočítat s použitím účinného počtu svorníků n_{ef} [14]:

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{a_1}{13*d}} \right\} \quad (8)$$

kde a_1 je rozteč mezi svorníky ve směru vláken [mm];

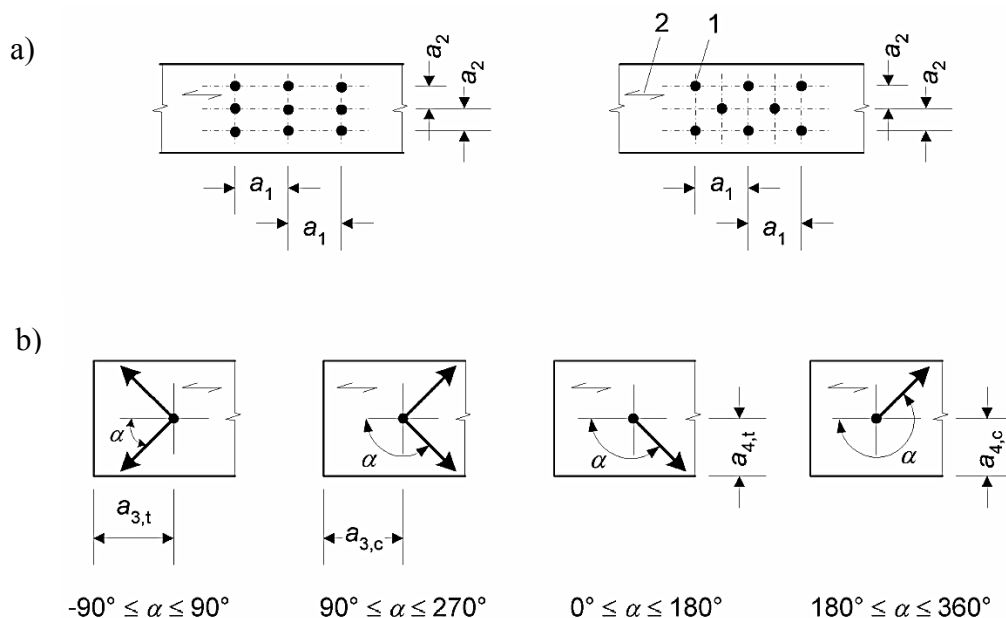
d průměr svorníku [mm];

n počet svorníků v řadě.

Pro zatížení kolmo k vláknům se účinný počet spojovacích prostředků může uvažovat jako:

$$n_{ef} = n \quad (9)$$

Pro úhly $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ mezi zatížením a směrem vláken se může n_{ef} určit pomocí lineární interpolace mezi vztahy (8) a (9).



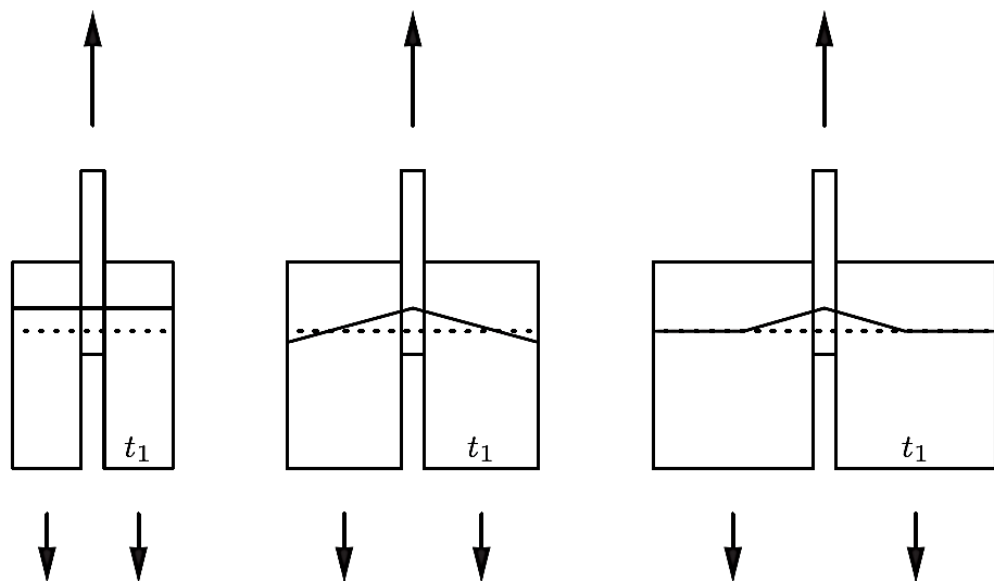
obr. 11 Rozteče a vzdálenosti od konců a okrajů; a) rozteče rovnoběžně s vlákny v řadě a kolmo k vláknům mezi řadami, b) vzdálenosti od okrajů a konců [14]

3.5.3 Porušení spoje blokovým smykem a zátkovým smykem

Pro stanovení únosnosti spoje se skupinou spojovacích prostředků je nutno zohlednit vytvoření plastického kloubu ve svorníku, otláčení spojovaných prvků, kumulace normálového napětí kolmo na vlákna a vliv smykového napětí od okolních spojovacích prostředků, které způsobuje rozštěpení dřeva. Ohybová únosnost spojů závisí na geometrickém uspořádání spoje a rozměrech jednotlivých prvků zejména počtu stříhových rovin a tloušťce spojovaných částí. V dřevěném prvku z rostlého dřeva docházelo k porušení tahem kolmo na vlákna a z vrstveného dřeva zpravidla tahem a tlakem rovnoběžně s vlákny [6].

Pro symetrické připojení oceli ke dřevu lze rozlišit tři mechanismy porušení dle počtu vzniklých plastických kloubů, viz obr. 12 [14]. Prvním způsobem porušení je otláčení v jednom nebo obou prvcích sousedících s rovinou stříhu, dalším způsobem je vytvoření plastického kloubu v oblasti jednoho z prvků a podle posledního mechanismu dochází k vytvoření plastického kloubu v obou prvcích. O způsobu porušení rozhoduje i účinná štíhlost svorníku nebo kolíku. Pokud je účinná štíhlost příliš malá, dojde k porušení spoje a rozštěpení dřeva dříve než dojde k roznosu zatížení na všechny spojovací prostředky. Svorníky v tomhle případě zůstávají i po překročení únosnosti přímé, bez viditelnějších deformací. Naopak v případě velké účinné štíhlosti, tedy větší než mezní ohybová štíhlost, pak dochází k vyčerpání ohybové únosnosti spojovacího prostředku a vytvoření plastických deformací. Způsob porušení s vytvořením plastických kloubů svorníků a prokluzem spoje přibližně odpovídá stanovené únosnosti dle ČSN EN 1995-1-1:2007 [3].

Po dosažení ohybové únosnosti svorníkového spojovacího prostředku dochází díky připevněné matici a hlavně svorníku k vytvoření osových sil, které zvyšují únosnost spojovacího prostředku ve stříhu. V případě uvažování těchto sil nebo vyvozením osových sil předpětím spojovacího prostředku může dojít k navýšení únosnosti oproti hodnotám vycházejícím z publikací K. W. Johansena [3].



obr. 12 Možné mechanismy porušení dvojstřížného spoje typu ocel-dřevo dle normy ČSN EN 1995-1-1 [14]

U spojů ocel-dřevo, skládajících se ze skupiny spojovacích prostředků kolíkového typu, namáhaných složkou síly rovnoběžně s vlákny blízko konce dřevěného prvku, může docházet k rozštěpení dřeva v linii spojovacích prostředků nebo mezi prvním spojovacím prostředkem a okrajem dřeva [3]. Charakteristická únosnost lomu po obvodu plochy spojovacích prostředků proti porušení blokovým a zátkovým smykem, jak je znázorněno na obr. 13 (porušení blokovým smykem) a obr. 14 (porušení zátkovým smykem), se má v takovém případě uvažovat jako [14]:

$$F_{bs,Rk} = \max \left\{ 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k} \right. \\ \left. 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \right\} \quad (10)$$

$$A_{net,t} = L_{net,t} t_1 \quad (11)$$

$$A_{net,v} = \left\{ \begin{array}{l} L_{net,v} t_1 \rightarrow \text{způsob porušení } f \\ \frac{L_{net,v}}{2} (L_{net,t} + 2t_{ef}) \rightarrow \text{způsob porušení } g, h \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$L_{net,t} = \sum_i l_{t,i} \quad (13)$$

$$L_{net,v} = \sum_i l_{v,i} \quad (14)$$

Pro tlusté ocelové desky pro způsob porušení h se t_{ef} určí

$$t_{ef} = 2 \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k} d}} \quad (15)$$

Pro tlusté ocelové desky pro způsob porušení g se t_{ef} určí

$$t_{ef} = t_1 \left[\sqrt{2 + \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] \quad (16)$$

kde $F_{bs,Rk}$ je charakteristická únosnost při blokovém smyku nebo zátkovém smyku [N];

$A_{net,t}$ čistá průřezová plocha kolmo k vláknům [mm²];

$A_{net,v}$ čistá smyková plocha rovnoběžná se směrem vláken [mm²];

$L_{net,t}$ čistá šířka průřezu kolmo k vláknům [mm];

$L_{net,v}$ celková čistá délka plochy smykového lomu [mm];

$l_{t,i}, l_{v,i}$ definovány na obrázku obr. 13 [mm];

t_{ef} účinná výška závislá na způsobu porušení spojovacího prostředku [mm];

t_1 tloušťka dřevěného prvku nebo hloubka vniku spojovacího prostředku [mm];

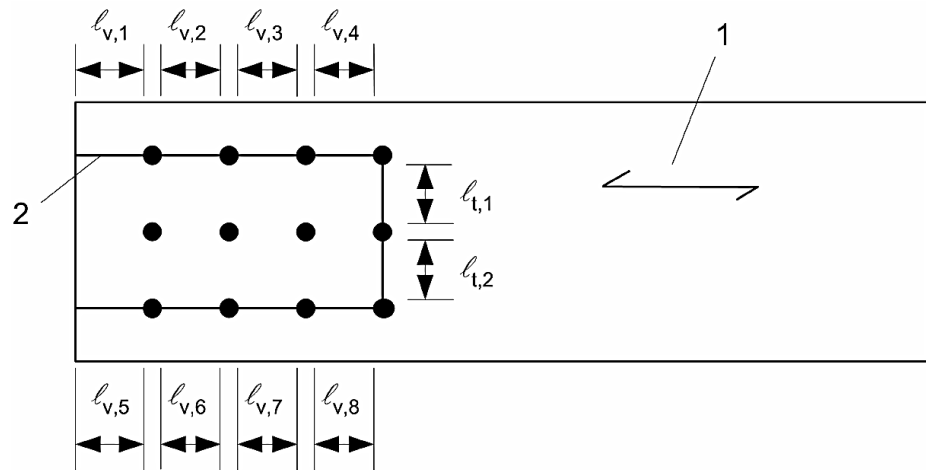
$M_{y,Rk}$ charakteristický plastický moment únosnosti spojovacího prostředku [Nmm];

d průměr spojovacího prostředku [mm];

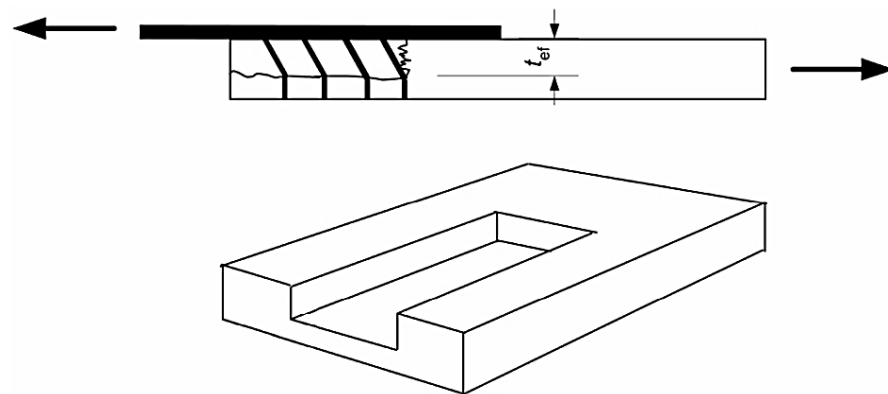
$f_{t,0,k}$ charakteristická pevnost v tahu dřevěného prvku [Nmm²];

$f_{v,k}$ charakteristická pevnost ve smyku dřevěného prvku [Nmm²];

$f_{h,k}$ charakteristická pevnost v otláčení dřevěného prvku [Nmm²].



obr. 13 Příklad porušení blokovým smykem: 1 - směr vláken, 2 - čára lomu [14]



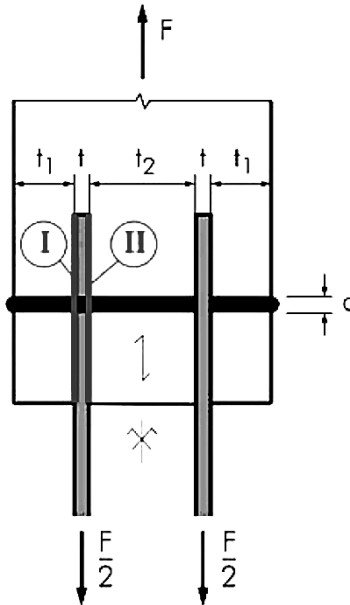
obr. 14 Příklad porušení zátkovým smykem [14]

3.5.4 Výpočet únosnosti víceřizných spojů ocel-dřevo

V publikaci [10] byl názorně popsán postup pro výpočet únosnosti víceřizných spojů ocel-dřevo, viz obr. 15. Výpočet se provádí pro každou stříhovou rovinu. Únosnosti v jednotlivých stříhových rovinách se určují dosazením do rovnice

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\} \quad (17)$$

Pro tyto vztahy je uvažován úhel působící síly a vláken $\alpha = 0^\circ$ a není zde uvažován příspěvek lanového efektu. Odolnost spoje je kromě úhlu působící síly a vláken závislá také na poměru tloušťky spojovaných částí, resp. na umístění ocelových plechů. Doporučuje se, aby ve čtyřřizném spoji byly tloušťky dřeva v poměru od 1:2:1 do 2:3:2.



obr. 15 Znáornění působících vnitřních sil vícešřížného spoje ocel-dřevo [10]

- kde I, II jsou stříhové roviny;
 d průměr spojovacího prostředku [mm];
 t_1, t_2 tloušťky dřevěných částí [mm];
 t tloušťka ocelového plechu [mm].

Stříhová rovina I

Rozhodující hodnota odolnosti spojovacího prostředku ve stříhové rovině I se pro krajní část dvojitřizného spoje s vnitřním vloženým plechem určí jako nejmenší hodnota z následujících vztahů [10]:

$$R_{I,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\} \quad (18)$$

Stříhová rovina II

Rozhodující hodnota odolnosti spojovacího prostředku ve stříhové rovině II se určí jako nejmenší hodnota z následujících vztahů [10]:

- a) Krajní část dvojitřizného spoje s vnitřním vloženým plechem

$$R_{IIa,k} = \min \left\{ \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{2 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d}} \right\} \quad (19)$$

- b) Vnitřní část dvojitřizného spoje s plechem z vnější části

Předpokládá se, že spojovací prostředek se v tomto místě uvažuje vetknutý do plechu

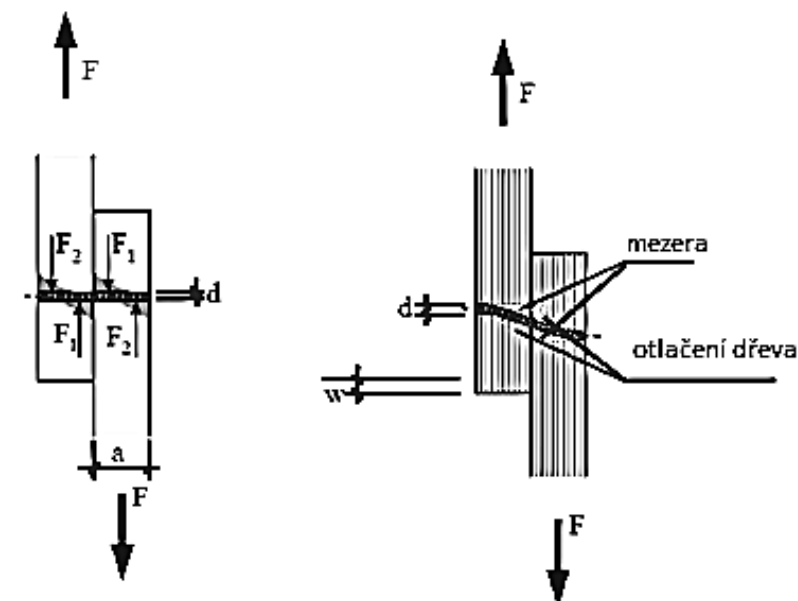
$$R_{IIb,k} = \min \left\{ 0,5 f_{h,1,k} t_2 d \right. \\ \left. 2 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} \right\} \quad (20)$$

Charakteristická hodnota odolnosti čtyřstržného spoje s kolíky nebo svorníky se po výpočtu určí [10]:

$$R_k = 2 \left(\min\{R_{I,k}\} + \min\{R_{IIa,k}\} \right) \quad (21)$$

3.5.5 Porušení spoje otláčením dřevěného prvku

Síla F ve spoji se přenáší kontaktem – dochází k otláčení dřeva v oblasti stříhové roviny od spojovacího prostředku. Síla F_1 a F_2 tvoří dvojici sil s malou excentricitou, jejich momentový účinek se rovná momentovému účinku sil působících na vnějších ramenou. Síly F způsobují ohybové namáhání kolíku, které zapříčiňuje deformaci, viz obr. 16. Odolnost kolíkového spoje závisí na pevnosti dřeva v otláčení stěny otvoru a hodnotě meze kluzu kolíku. Tento způsob dimenzování se odvíjí z vědeckých prací K.W. Johansena [15], podle jehož teorie se určí odolnost ve stříhu kolíkových spojovacích prostředků [10].



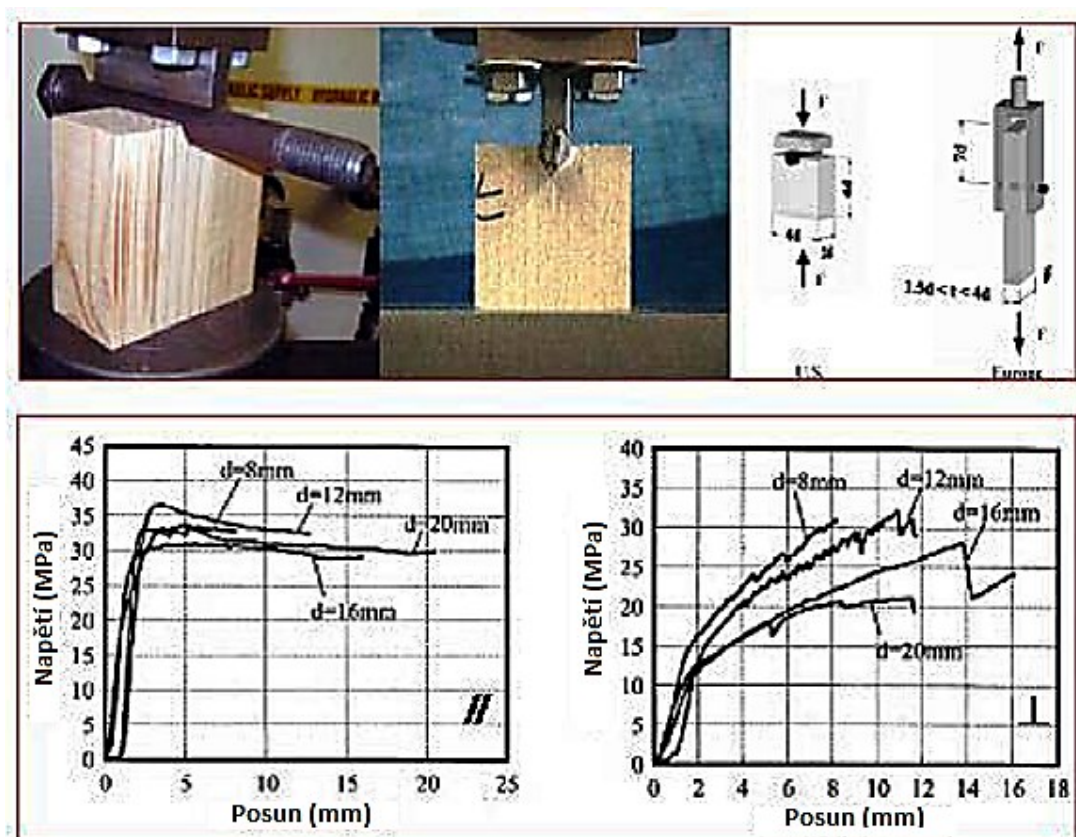
obr. 16 (vlevo) Přenos sil spoje; (vpravo) Deformace kolíkového spoje [10]

Radiální otláčení dřeva je možné rozdělit na dvě složky – složku rovnoběžnou s působící silou a složku kolmou na působící sílu. Pevností v otláčení stěny otvoru se označuje odolnost dřeva vůči složce síly rovnoběžné se směrem síly. Jak je zřetelné na obr. 17, při zatlačení spojovacího prostředku do dřeva ve směru vláken je zjevné stlačení ve směru vláken i kolmo na vlákna. Takovou deformaci způsobuje tahové napětí kolmo na vlákna a při zvýšení zatížení dochází k rozštěpení dřeva. Na pevnost v otláčení stěny otvoru nemají vliv pouze materiálové vlastnosti dřeva jako je hustota dřeva, ale i průměr kolíku, kvalita jeho povrchu, způsob jeho osazení (předvrtané nebo nepředvrtané) a úhel mezi působící silou a vlákny dřeva [10].



obr. 17 Zvětšení otvoru ve vzorku vlivem otláčení dřeva ve směru vláken a zároveň kolmo na vlákna [10]

Pevnost v otláčení stěny otvoru pro řezivo, lepené lamelové dřevo a materiály na bázi dřeva se určuje dle normy ČSN EN 383 nebo jsou hodnoty přímo uvedeny v normě ČSN 73 1702. Způsoby porušení je možné zjišťovat také pomocí experimentálních tahových a tlakových zkoušek jako například z experimentů znázorněných na obr. 18 [10]. Byly zkoušeny kolíky průměru 8, 12, 16 a 20 mm. Z pracovních diagramů je patrný výrazný vliv průměru spojovacího prostředku na otláčení dřevěného prvku v místě otvoru. Graf vlevo ukazuje deformace vlivem napětí rovnoběžně s vlákny a pravý graf deformace při zatížení ve směru vláken.



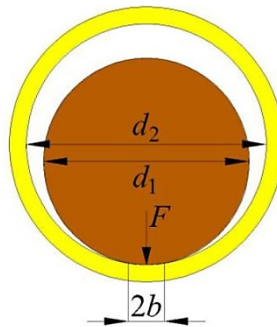
obr. 18 Fotografie z tlakových a tahových zkoušek na určení pevnosti v otláčení stěny otvoru dřeva a pracovní diagramy ze zkoušek zatížení rovnoběžně a kolmo na vlákna [10]

Hertzovo kontaktní napětí

Hertzovo kontaktní napětí charakterizuje případ dvou těles se zakřivenými povrchy. Vzájemným stlačováním se změní bod nebo čára dotyku na kontaktní plochu a v tělesech vzniká prostorová napjatost. Nejčastějším případem je vznik napětí mezi dvěma dotýkajícími se tělesy s odlišnými poloměry křivosti. Jsou odvozeny dva základní případy výskytu Hertzova napětí. Jedná se o výpočet napětí mezi dvěma koulemi nebo výpočet napětí mezi dvěma válci s rovnoběžnými osami. Kolíkový spojovací prostředek v dřevěném prvku nejpřesněji vystihuje kontakt dvou válců s osami o délce l a průměry d_1 a d_2 . Dotykovou plochu válců tvoří úzký obdélník o šířce $2b$ a délce l . Při působení jednoho válce vně druhého, viz obr. 19, se poloviční šířka dotykové plochy b určí ze vztahu [16]

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}} \quad (22)$$

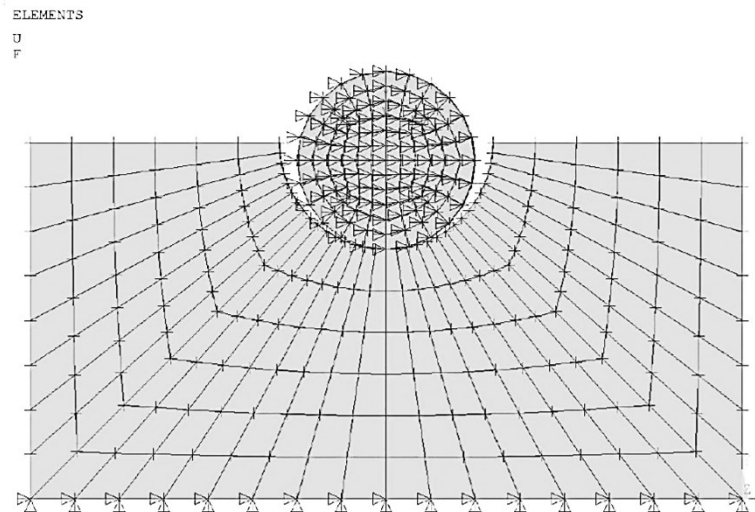
- kde b je poloviční šířka dotykové plochy [mm];
 E Youngův modul pružnosti ve směru dle indexu [MPa];
 ν Poissonova konstanta [-];
 G modul pružnosti ve smyku rovině dle indexu [MPa];
 F síla působící v kontaktu dvou těles [N];
 d průměr válce dle indexu [mm];
 l délka válce [mm].



obr. 19 Kontaktní šířka $2b$ pro jeden válec průměru d_1 vně druhého válce průměru d_2 vzájemně stlačovaných silou F [16]

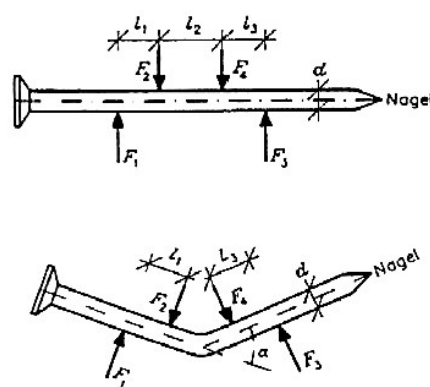
Numerickým modelováním kontaktního napětí spojovacího prostředku s dřevěným prvkem se zabývá práce Sedlák [16]. Na čtyřech materiálových modelech se stejnou geometrií, obr. 20, je provedeno posouzení Hertzova kontaktního napětí, které odpovídá kontaktu dvou válců s rovnoběžnými osami. Dva modely výpočtu uvažují lineárně izotropní chování smrkového dřeva. V jednom případě se jedná o pružněplastický materiálový model s izotropním zpevněním a Misesovou podmínkou plasticity. Druhý model popisuje chování bez zpevnění materiálu. Další dva výpočty jsou definovány ortotropními vlastnostmi dřevěného prvku, opět s rozdílem

materiálu se zpevnění a bez zpevnění. Numerický model byl porovnán s ručním výpočtem. Numerický výpočet prokázal různá kontaktní napětí v rozmezí hodnot mezi 21,8 a 118 MPa. Z numerického modelování vycházela kontaktní napětí výrazně menší, kromě modelu uvažujícím izotropní chování se zpevněním. Výsledky se nejvíce přibližují ručnímu výpočtu.

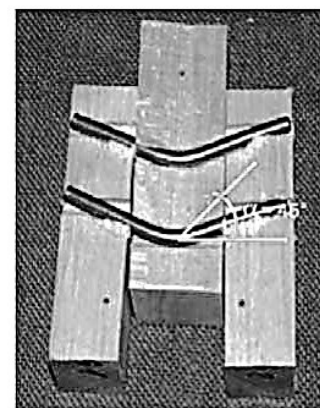


obr. 20 Statické schéma numerického modelu pro určení Hertzova kontaktního napětí [16]

V ČSN 73 1702 jsou dále uvedeny postupy pro určení plastického momentu na mezi kluzu nebo je možné provést zkoušku na ohyb dle ČSN EN 409, viz obr. 21 a). Druhou možností je určení dle ČSN EN 26891 [17], při kterém jsou spojovací prvky osazeny do dřeva a zkouší se celý spoj, viz obr. 21 b) [10].



a) ČSN EN 409



b) ČSN EN 26891

obr. 21 Zkoušky kolíkových spojovacích prostředků [10]

Na stupeň plastifikace deformovaného spojovacího prostředku má veliký vliv úhel α označený na obr. 21. Při zvyšující se deformaci nad hodnotu úhlu $\alpha = 45^\circ$ se předpokládá plná plastifikace spojovacího prostředku. S rostoucím průměrem spojovacího prostředku klesá hodnota úhlu α např. pro svorník průměru 8 mm až 16 mm se předpokládá hodnota úhlu α v intervalu 8° až 5° [10].

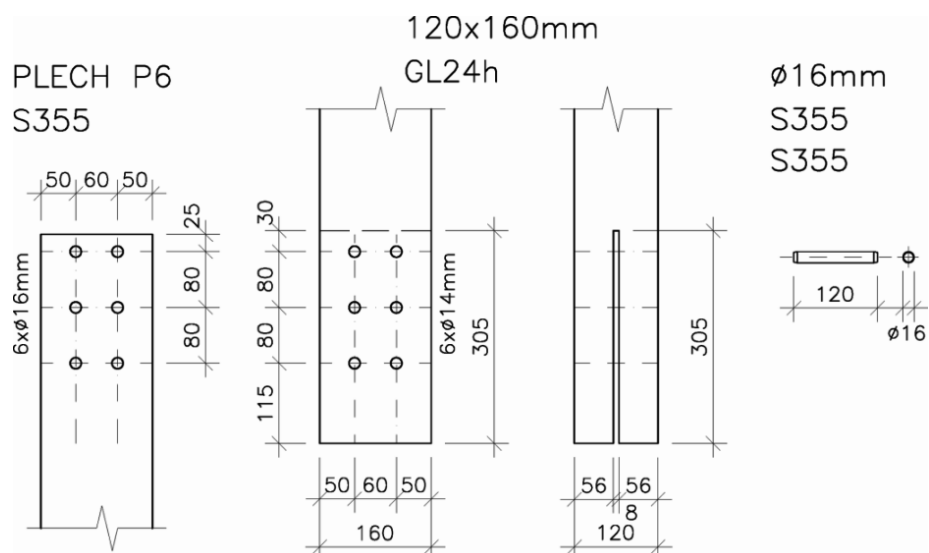
3.6 Publikované experimenty

Vlastnosti konstrukčních spojů se nejpřesněji ověřují experimentálně. Zkoušky probíhají v různých režimech namáhání a uspořádání spoje a lze jimi ověřit chování a stanovit únosnost. Experimentální přístup je výhodný v tom, že lze ověřit chování celého tělesa. Je ale omezen náklady, nízkým počtem parametrů a typů styčniců. Oproti tomu numerický přístup považuje spoj za sestavu komponent s vlastním mechanickým chováním [18].

Při zkouškách lze simulovat různé způsoby zatěžování. Jedná se o zatížení statické (s plynulým nárůstem intenzity až do porušení), statické opakované (s definovaným tvarem, intenzitou a rychlostí zatížení / odtížení) nebo dynamické (se zadanou frekvencí a rozkmitem). Základní rozdělení zkušebních metod je dle poškození sledovaného vzorku, tedy zkoušky destruktivní a nedestruktivní. Zkouší se prvky z rostlého i lepeného lamelového dřeva (BSH⁶). Pro experimentální měření je vhodnější lepené lamelové dřevo, které oproti řezivu má menší toleranci rozměrů, tvarové a geometrické odchylky prvků a méně významné přirozené vady. Materiál méně ovlivňuje výsledky měření z hlediska vad a geometrických odchylek prvku [13].

Experimenty se navrhují dle zkušebního zařízení s ohledem na rozměry zkušebních těles, jejich uchycení ve zkušebních zařízeních a způsobu a formy zatěžování [13].

V laboratořích Výzkumného centra AdMaS v Brně byly provedeny experimenty spoje lepeného lamelového dřeva s vloženým styčnicovým plechem spojeným kolíkovými prvky. Spojovací prostředky zde tvořily hladké kolíky z obvyklé třídy pevnosti S235JR, kolíky vysokopevnostní z nízkolegované oceli 1.3505 s mezí pevnosti 750 MPa a závitové tyče M16 třídy pevnosti 8.8 a 5.8. Uspořádání spoje z hlediska roztečí a vzdáleností od krajů a konců bylo navrženo dle doporučení ČSN EN 1995-1-1, viz obr. 22 [13].



obr. 22 Detaily experimentálního spoje [13]

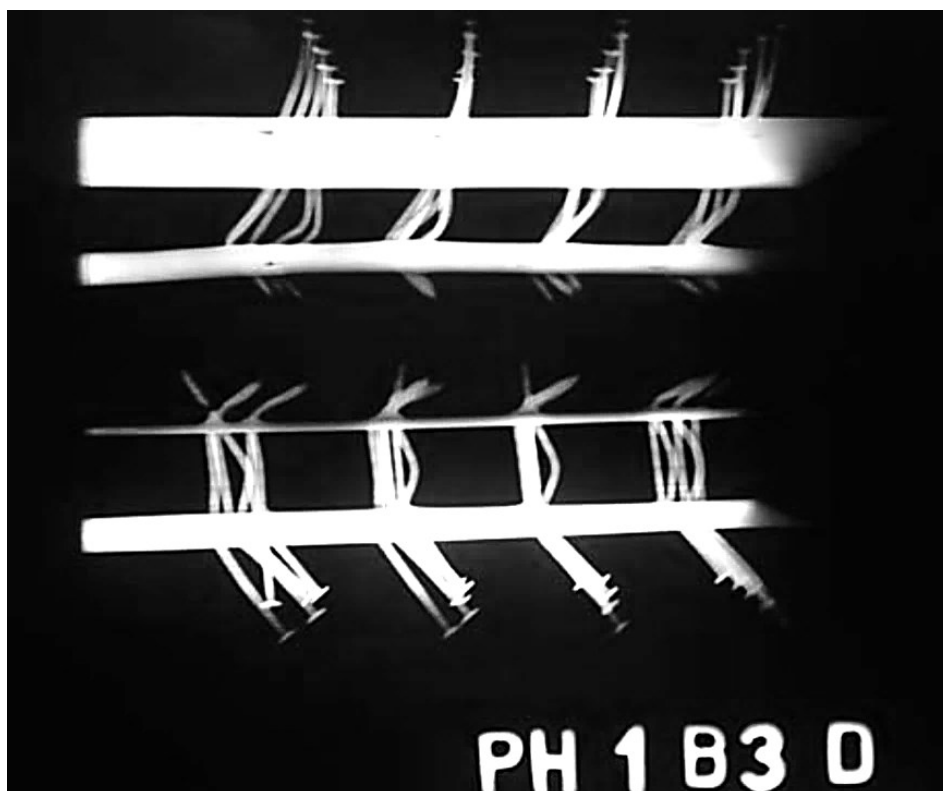
⁶ BSH - Lepené lamelové dřevo vyráběné ze dvou nebo více lamel z masivního dřeva vzájemně plošně slepených melaminovými lepidly

Uspořádání a zatěžování zkušebních těles má co nejvíce odpovídat reálnému stavu spojů v nosné konstrukci, nikoli ideálním podmínkám chování spoje, viz obr. 23. Rychlost zatěžování byla konstantní a volí se v mm/min nebo kN/min a celková doba zkoušky dosahovala 10 až 15 min. Během celé doby zkoušky byl zaznamenáván čas, velikost síly, posun příčnicku a deformace spoje ve dvou kolmých směrech [13].



obr. 23 Uspořádání zatěžovací zkoušky [13]

Během experimentů spojů s hřebíkovými spojovacími prostředky prováděných Ústavem kovových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební VUT v Brně bylo využito bezkontaktního měření deformací optickým videoextenzometrem, metody akustické emise a radiální defektoskopie. Dále lze měřit tenzometricky, plošně, povrchově, elektroakusticky a geodeticky. Přetvoření hřebíkového spoje vizualizované defektoskopicky [19] je vidět na obr. 24.



obr. 24 Snímek radiační defektoskopie dokumentující deformace [19]

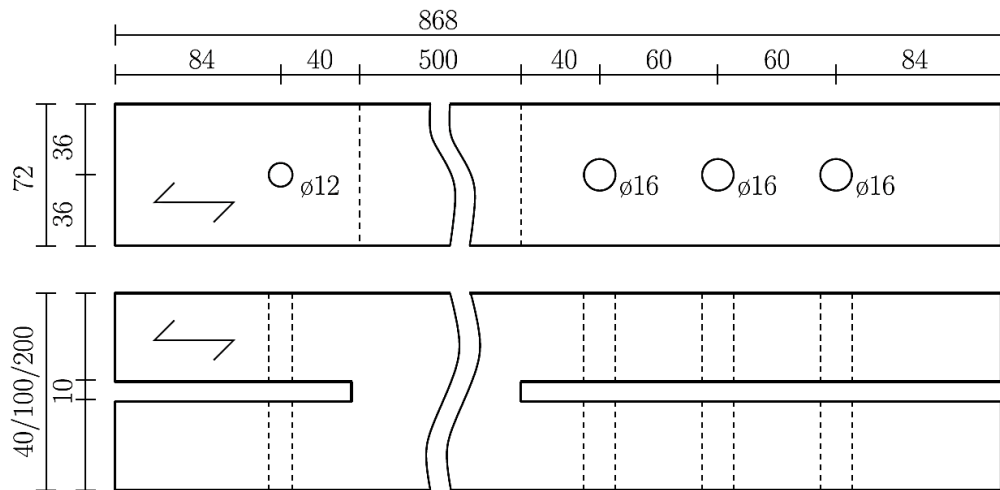
Zahraniční experimenty

Experimentálním studiím se věnovala řada zahraničních univerzit. Mechanické chování bylo poprvé popsáno v publikaci K. W. Johansena [15]. Byly odlišeny tři různé způsoby porušení, ale nebylo zohledněno křehké porušení. Práce se stala základem pro sestavení evropských návrhových norem [14] pro dřevěné konstrukce.

Zkoušky na Linnaeus University

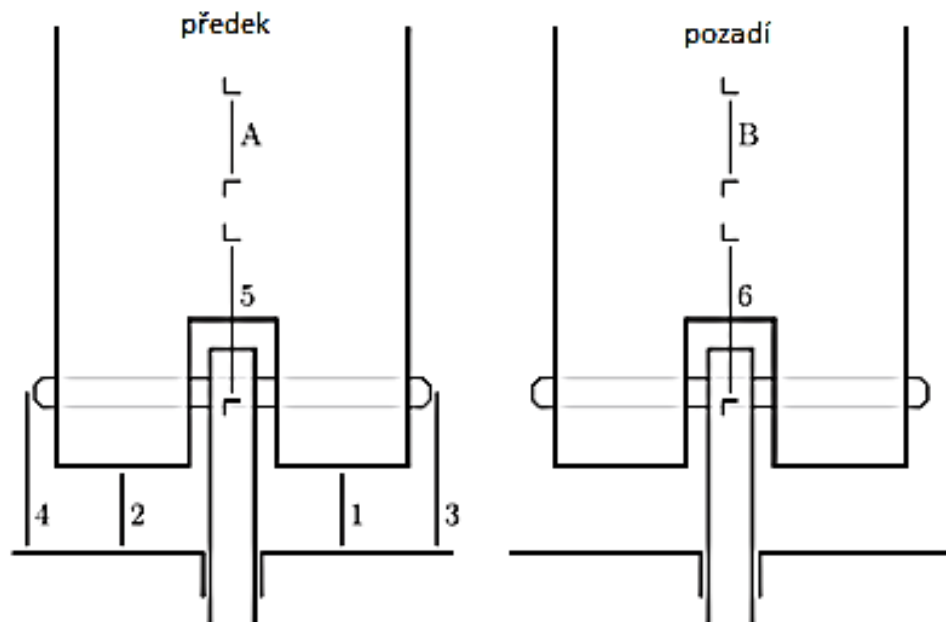
Většina numerických modelů je tvořena pouze pro podmínku rovinného napětí. Trojrozměrné působení se zanedbává. Jiné simulace používají pro modelování dřevěných částí pevných prvků. Zkoumají plechy pouze pro členy, pro které může být zanedbán vliv ohýbání kolíků. Pro popis chování byl experimentálně i numericky zkoumán vliv tření. Známý je experiment Linnaeus University [20]. Experimentálně se zabývali chováním během zatěžování styčnicku od počátečního formování styku dřeva a kolíku s přechodem z elastického na plastické chování s odpovídajícím snížením tuhosti.

Zkoušely se čtyři varianty vzorků ze smrkového dřeva. Vzorky byly vyřezávány a hoblovány na standardní rozměry délky 868 mm, tloušťky 72 mm a šířek 40, 100 a 200 mm, viz obr. 25. Pro ocelové kolíky a plechy byly předvrtány otvory. Jednalo se o kolíky průměru 12 a 16 mm a o ocelové plechy tl. 8 mm z oceli S235JR bez povrchového ošetření. Výsledná střední hodnota napětí ocelových kolíků průměru 12 mm činila 708 N/mm^2 . Kolíky byly elektrolyticky galvanizovány.



obr. 25 Rozměry (mm) testovaných vzorků [20]

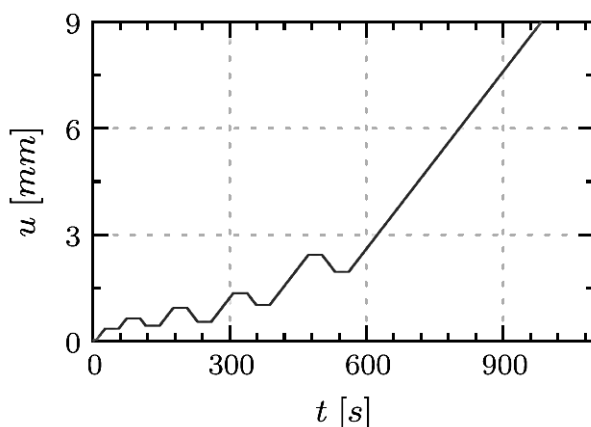
Odkoušeno bylo 64 vzorků, které byly zařazeny do 17 kategorií. Pokusy byly prováděny pomocí jednoosého elektromechanického univerzálního zkušebního stroje, který obsahuje snímače tahu s rozsahem $\pm 2,5$ mm. Před testováním byly změřeny rozměry a hmotnost vzorků. Stanovené rozměry a hustoty kategorií vzorků jsou uvedeny v tab. 2. Měření posunu probíhalo v jednotlivých bodech znázorněných na obr. 26. Většinou se zkoušelo v cyklech při různých zatěžovacích úrovních. U vzorků šířky 100 a 200 mm bylo zvyšování zatížení v krocích o 5 kN a u vzorků širokých 40 mm v krocích o 2 kN. Počáteční krok představoval zatížení 500 N po dobu 5 s, viz obr. 27.



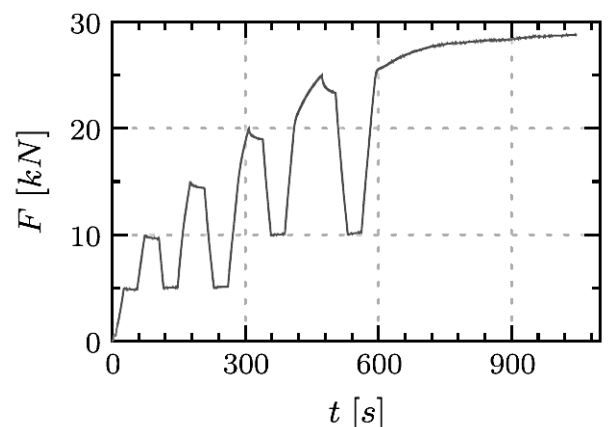
obr. 26 Schéma vzorku s vyznačenými sledovanými body posunutí [20]

tab. 2 Rozměry a hustoty jednotlivých sérií zkoušených vzorků [20]

Série	Šířka (mm)	Hustota (kg/m ³)
01	100	485
02	100	404
04	100	502
05	40	419
05B	100	374
07	200	402
08A	100	513
08B	100	489
09A	40	458
10	100	438
13	100	495
14	100	441
15	200	424
16A	100	384
16B	100	344
16C	100	360
16D	100	374



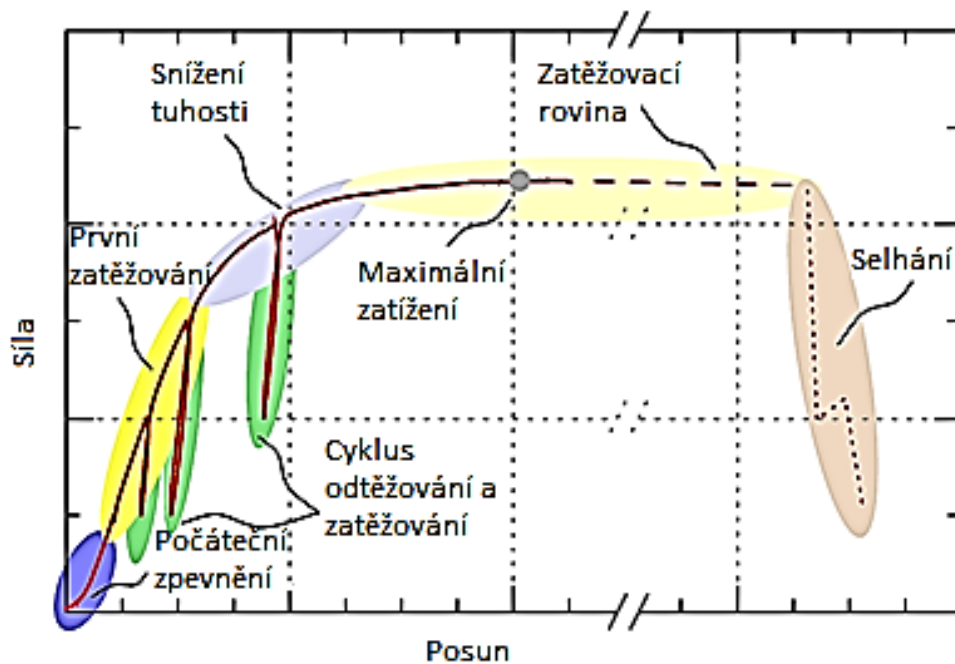
a) Závislost čas – přemístění bodu



b) Závislost čas – působící síla

obr. 27 Typické zatěžovací schéma - vnesené posunutí 1 mm/min [20]

Měřicí zařízení umožňovalo měřitelný posun 10 mm, což nebylo dostatečné pro měření deformace vzorku až do kolapsu. Hustota všech vzorků se lišila v rozmezí 360 až 513 kg/m³ s průměrem 430 kg/m³. Podle K.W. Johansena byly uvažovány tvary porušení s jedním plastickým kloubem v rovině symetrie kolíku s plastickým chováním v dřevěných prvcích. Série s menší hustotou vykazovaly větší posuny do porušení vzorku. Posunutí v závislosti na namáhání jsou zobrazeny na obr. 28.



obr. 28 Jednotlivé fáze na grafu závislosti deformace na působící síle [20]

Zkoušky prokázaly nízkou tuhost v počátku zatěžování. Nízká tuhost je způsobena nedokonalým kontaktem mezi spojovacím prostředkem a dřevem, což vyplývá z drsnosti vzorku v kontaktní zóně. Osa předvrtaného otvoru nebývá dokonale rovná, ale často zakřivená nebo není v pravém úhlu k zatěžovací síle. Závisí na vrtacím nástroji, rychlosti vrtání, opotřebení nástroje. Geometrické i povrchové nedokonalosti vedou k nižší tuhosti spoje na počátku zatížení. Ve spojích střední a vysoké štíhlosti se kontaktní oblasti vyvíjí v důsledku progresivního ohýbání kolíku.

Část prvního zatěžování označuje fázi, ve které je maximální tuhost během prvního zatěžování. V této části je také nelineární průběh křivky síla-deformace pozorovaný u většiny testů a aproximace přímkou je možná pouze přes krátké úseky.

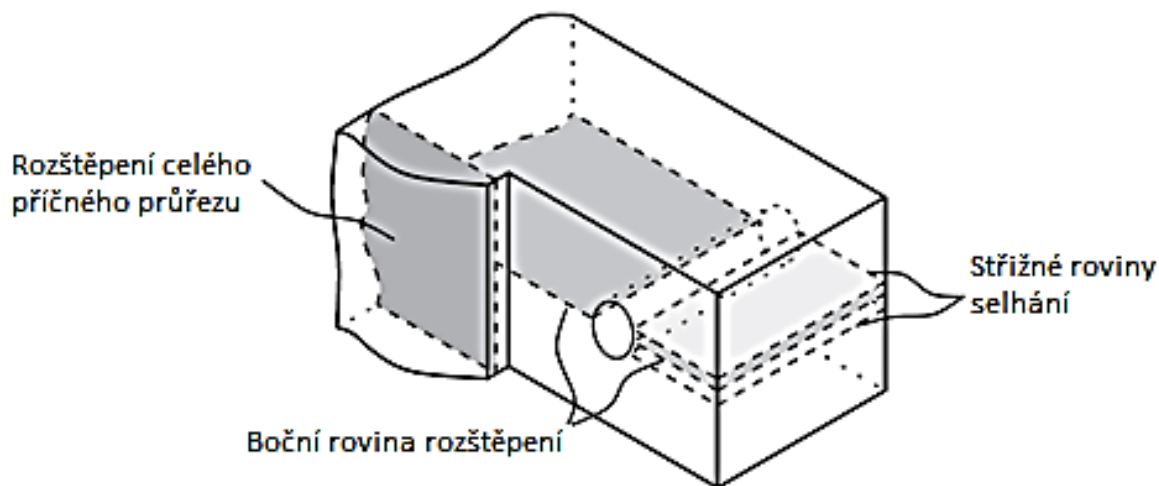
Tuhost během cyklu odtěžování a následného zvyšování zatížení výrazně překračuje maximální tuhost během prvního zatěžování. Na rozdíl od prvního zatěžování se ale projevuje lineárně elastické chování materiálu.

Během dalšího zatěžování je v následné části patrné výrazné snížení tuhosti až do dosažení maximálního zatížení. Toto snížení je způsobeno dosažením pevnosti dřeva v tlaku a růstem plastických deformací. Navíc se v ocelovém kolíku vytvoří plastický kloub v závislosti na štíhlosti spojovacího prostředku.

U vzorků ze dřeva s vysokou hustotou nebylo vodorovné části grafu vůbec dosaženo. U dřeva s nízkou hustotou naopak docházelo k posunu až do 20 mm. V takovém případě docházelo ke křehkému selhání dřeva způsobené smykem.

Poslední etapou grafu je režim selhání, který se liší v závislosti na zatížení, hustotě dřeva, tření a způsobu vyztužení. Při nízkém tření mezi dřevem a kolíkem a vysoké hustotě dřeva

docházelo k bočnímu rozštěpení dřeva, viz obr. 29. Ztráta smykem se často objevuje v kombinaci s porušením v tahu v bočním směru. U vzorků s vysokým třením bylo pozorováno selhání smyku mezi kolíkem a dřevem a ve spojení s bočním rozštěpením. Vyskytuje se v případech, kdy je zabráněno bočnímu rozštěpení. Rozštěpení celého průřezu je konečný režim selhání při zabránění bočního rozštěpení. Opět dochází nejprve k lokálnímu smykovému selhání, což umožňuje velké deformace a výsledkem je globální houževnaté chování. Velice ohýbaný kolík odtlakuje dřevěné rozštěpené části od sebe, aby se mohly plně rozvinout tahové síly působící na rovinu kolmou na osu kolíku.

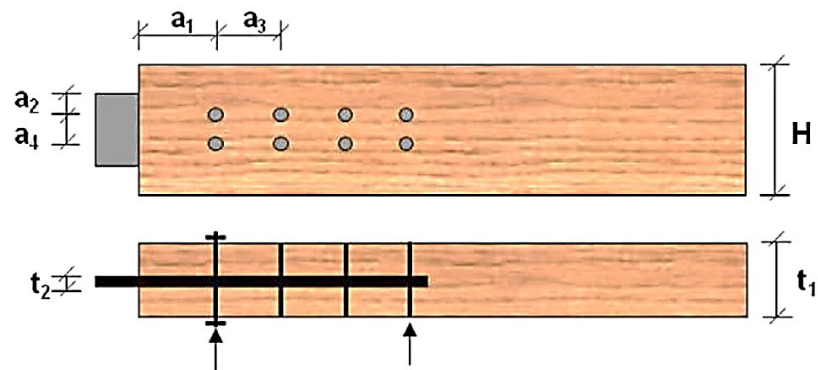


obr. 29 Režimy selhání spoje [20]

V ČSN EN 1995 [14] se při určení tuhosti spojení nezohledňuje šířka spoje. Tuhost konstrukce je tedy určena s nepřesností a může vést k nespolehlivým výsledkům ve statickém návrhu. Neuvažuje se se změnou tuhosti při prvním a opakovaném zatěžování. V porovnání s experimentálními výzkumy poskytovaly numerické simulace lepší popis chování dřevěných spojů.

Experiment v Laboratoire Mécanique Ingénieries, LAMI

Progresivní selhání dřeva nelze modelovat pomocí elastoplastického ortotropního materiálového modelu. Proto se Kharouf a kol. [21] zabývali analýzou svorníkových spojů a modelovali dřevo jako elastoplastický ortotropní a lineárně elastický ortotropní materiál se zaměřením na dosažení maximálního napětí jako kritérium selhání. Z experimentů s použitím jednoho svorníku vyplynulo, že předvídané režimy selhání jsou v souladu s experimentálními pozorováními. Tuhost z numerického modelu však vyšla vyšší než experimentální, pravděpodobně z důvodu zanedbání smykového namáhání [18]. Experimenty probíhaly se vzorky s rozměry uvedenými v tab. 3. Uvedené rozměry jsou znázorněny na obr. 30.

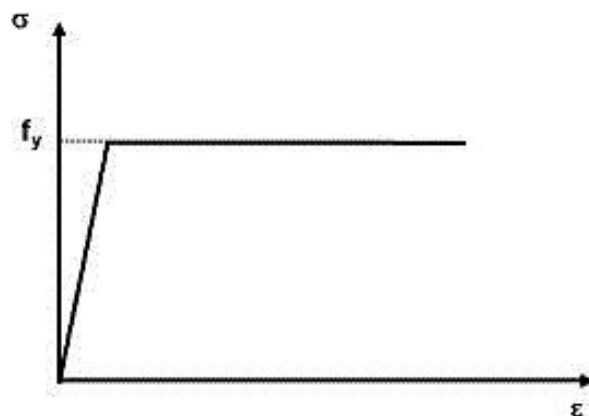


obr. 30 Popis rozměrů experimentálního vzorku [18]

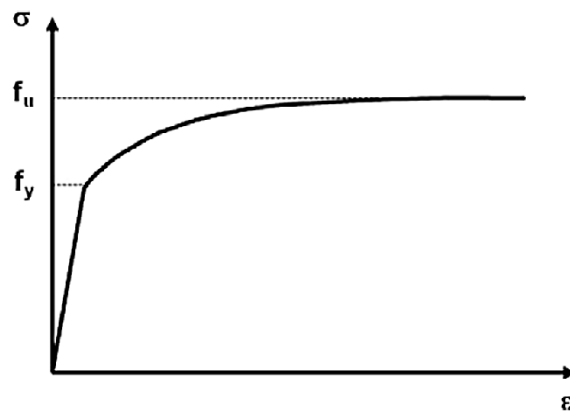
tab. 3 Rozměry testovaných vzorků [18]

	d	t_1	t_2	a_1	a_2	a_3	a_4	H
A	16	160	8	159	25	112	64	254
B	16	160	8	255	25	208	64	254
C	20	160	10	187	32	140	80	295
D	20	210	10	187	32	140	80	295

Při každém přírůstku zatížení jsou nezávisle pozorovány tři normálová a tři smyková napětí proti kritickým hodnotám, proto byl vytvořen 3D-FEM⁷ model. Předpověď konečného zatížení byla konzervativní. V současném stavu poznání neexistuje úplný numerický model, který může předpovídat dobré chování posunutí v závislosti na zatížení. Interaktivní porucha totiž nebyla vzata v úvahu a je obtížně aplikovatelná k posouzení interakčních koeficientů. Největší rozdíl numerického modelu je uvažováním bilineárního diagramu oceli kolíku, tedy horizontální větve po dosažení meze kluzu na obr. 31. Závislost napětí a deformace ocelové desky je nelineární, což vyplývá i z tahových zkoušek oceli, viz obr. 32.

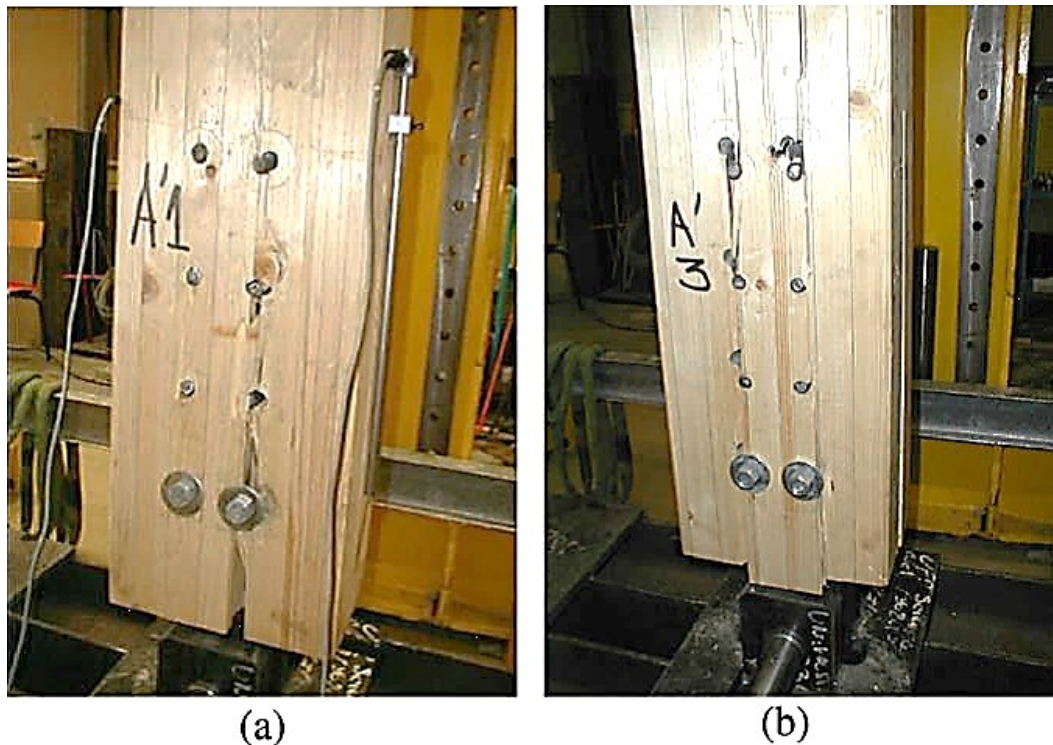
obr. 31 Bilineární diagram oceli kolíku [18]
 f_y – mez kluzu [MPa]

⁷ FEM (Finite element method) – metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu; metoda je blíže popsána v kapitole 3.7.1



obr. 32 Nelineární diagram oceli plechu [18]
 f_y – mez kluzu [MPa]; f_u – mez pevnosti [MPa]

Vlastnosti dřeva lze považovat za příčně izotropní, jsou tedy stejné v radiálním a tangenciálním směru. V tomto experimentu bylo použito lepené lamelové dřevo třídy GL28h hustoty 450 kg/m^3 a vlhkosti 10%. Pro izotropní materiály jsou během zatěžování sledovány tři veličiny: maximální normálové napětí, maximální smykové napětí a deformační energie. Na obr. 33 jsou znázorněny deformace po překročení daného kritéria.

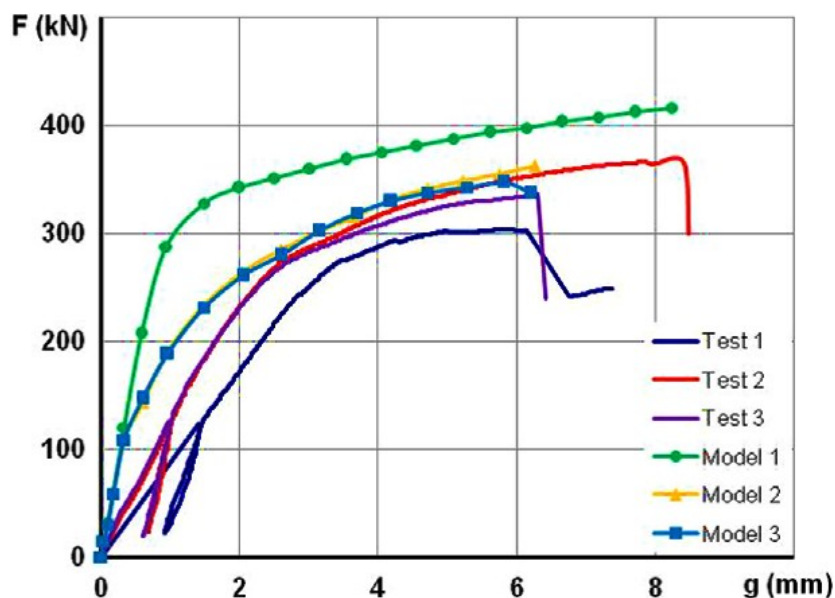


obr. 33 Režim selhání experimentálních vzorků a) A'1; b) A'3 [18]

Vlivem velké variability vlastností dřeva jsou výsledky simulace ovlivňovány zadáním parametrů vzorku. Selhání dřeva je simulováno postupně snižováním modulu pružnosti.

Byly vytvořeny tři numerické modely, jejichž porovnání s experimenty je zaznamenáno na obr. 34. Výsledné únosnosti jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 4. V případě modelu 1 je

elastoplastické příčně izotropní chování hodnoceno podle Hillova kritéria selhání. Model 2 je hodnocen dle Hoffmanova kritéria a model 3 kombinací obou zmíněných kritérií pro řízení plastického selhání v kombinaci s vývojem poškození dřeva. Z grafu na obr. 34, který vykresluje závislost prodloužení na působící síle je patrné, že v případě modelu 1 byla numerická analýza nadhodnocena a byly získány větší hodnoty únosnosti než experimenty. Model 2 a model 3 předpovídaly lépe chování vzorku během experimentu.



obr. 34 Porovnání tří experimentů s numerickými simulacemi [18]

tab. 4 Srovnání výsledných analytických a experimentálních hodnot únosnosti [18]

	A	B	C	D
F_{exp} (kN)	335	374	456	450
F_{EC5} (kN)	271	316	340	415
$F_{\text{analytical}}$ (kN)	317	354	405	447
$F_{\text{EC5}}/F_{\text{exp}}$	81%	84%	75%	92%
$F_{\text{analytical}}/F_{\text{exp}}$	95%	95%	89%	99%

Materiálový model popisuje nejen nelineární mechanické chování dřeva v tahu a tlaku, ale také elastoplastické deformace do selhání vlivem napětí. Kvůli nedostatku experimentálních dat jako jsou povrchové deformace a posuny, nebyl model ověřen příliš podrobně. Z numerické analýzy byly získány dva výsledky. Jedním z nich je rozložení zatížení mezi připojovanými prvky v průběhu zatěžování a jednotné rozdělení při konečném zatížení. Experimenty bylo zjištěno, že pevnost v tahu kolmo k vláknům a smykové napětí rovnoběžně s vlákny v jednotlivých připojovaných prvcích jsou téměř stejné. Tahová napětí kolmo na spojovací prostředek jsou v blízkosti otvoru spojovacího prostředku blízko konce dřevěného spoje. Tato pozice se považuje za kritickou pozici.

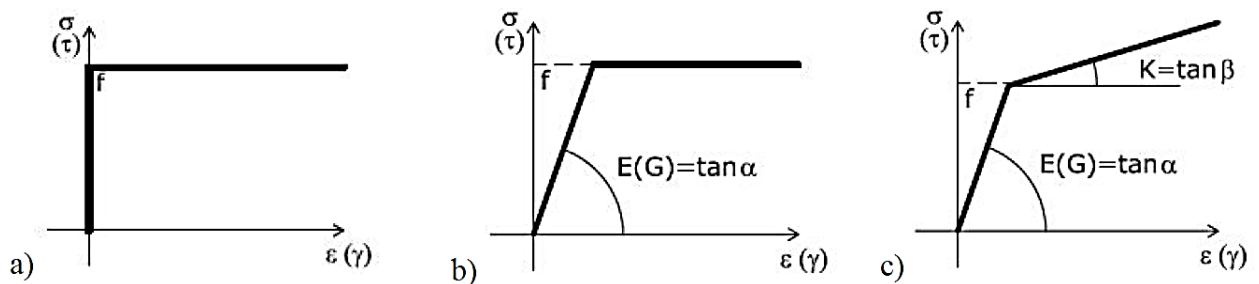
3.7 Problematika numerického modelování

3.7.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda, jejímž základním principem je diskretizace spojitého kontinua do určitého počtu prvků. V jednotlivých uzlových bodech prvků jsou poté určovány zjišťované parametry. Metoda má v inženýrských aplikacích široké použití, je vhodná i pro modelování styčnicku libovolné geometrie a libovolného zatížení. Využívá se především k simulaci průběhu napětí, deformace, vlastních frekvencí, proudění tepla či transportu vlhkosti. Pro simulaci se volí ze dvou způsobů výpočtu, modelování deskostěnových či prostorových prvků. Volba způsobu výpočtu závisí na složitosti konstrukce. Prostorové modelování je časově a výpočetně náročnější [22].

3.7.2 Materiálové modely

Ve výpočetních modelech lze materiál považovat za tuhý (resp. tuho plastický), lineárně nebo nelineárně pružně plastický. Materiálové modely na obr. 35 uvažují s lineárním nebo nelineárním zpevněním. V případě zatěžování tahovou osovou silou se popisuje závislost síly F na přetvoření δ [3].



obr. 35 Základní modely chování materiálu: a) ideálně tuho plastický; b) ideálně pružně plastický; c) pružně plastický lineárně zpevňující [3]

3.7.3 Pružný materiálový model

Při jednoosém namáhání v ose x platí Hookův zákon, který vyjadřuje závislost napětí na modulu pružnosti a poměrném přetvoření.

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (23)$$

kde σ_x je normálové napětí ve směru osy x [MPa];

ε_x deformace ve směru osy x [-];

E Youngův modul pružnosti [MPa].

Nejlépe lze tento vztah vysvětlit na trámku dle schématu obr. 36. Z příkladu je patrné prodloužení trámku o vzdálenost Δl a zároveň vlivem příčné kontrakce dochází k ovlivnění zbývajících normálových složek deformace dosahující záporných hodnot, které jsou výrazně ovlivněny Poissonovým součinitelem. Deformace ve zbytkových směrech vyjadřuje rovnice [16]:

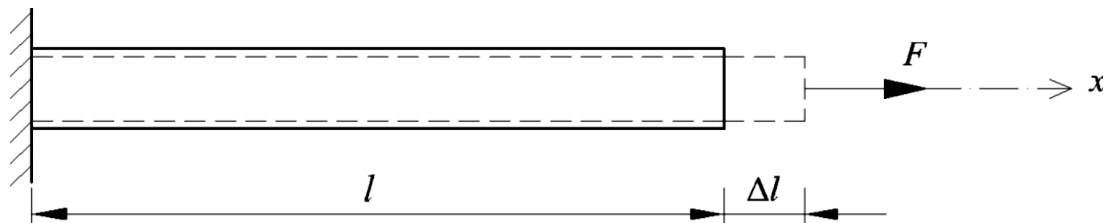
$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x = -\nu\frac{\sigma_x}{E} \quad (24)$$

kde σ je normálové napětí ve směru osy dle indexu [MPa];

ε deformace ve směru osy dle indexu [-];

ν Poissonův součinitel [-];

E Youngův modul pružnosti [MPa].



obr. 36 Schématický příklad relativního prodloužení [16]

Při znalosti působící tahové síly a průřezové plochy namáhaného tělesa lze Hookův zákon zapsat ve tvaru [16]

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S} \quad (25)$$

kde Δl je prodloužení [mm];

l_0 původní délka [mm];

E Youngův modul pružnosti [MPa];

F síla [mm];

S průřezová plocha [mm²].

Modul pružnost ve smyku G se určí vztahem [16]

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (26)$$

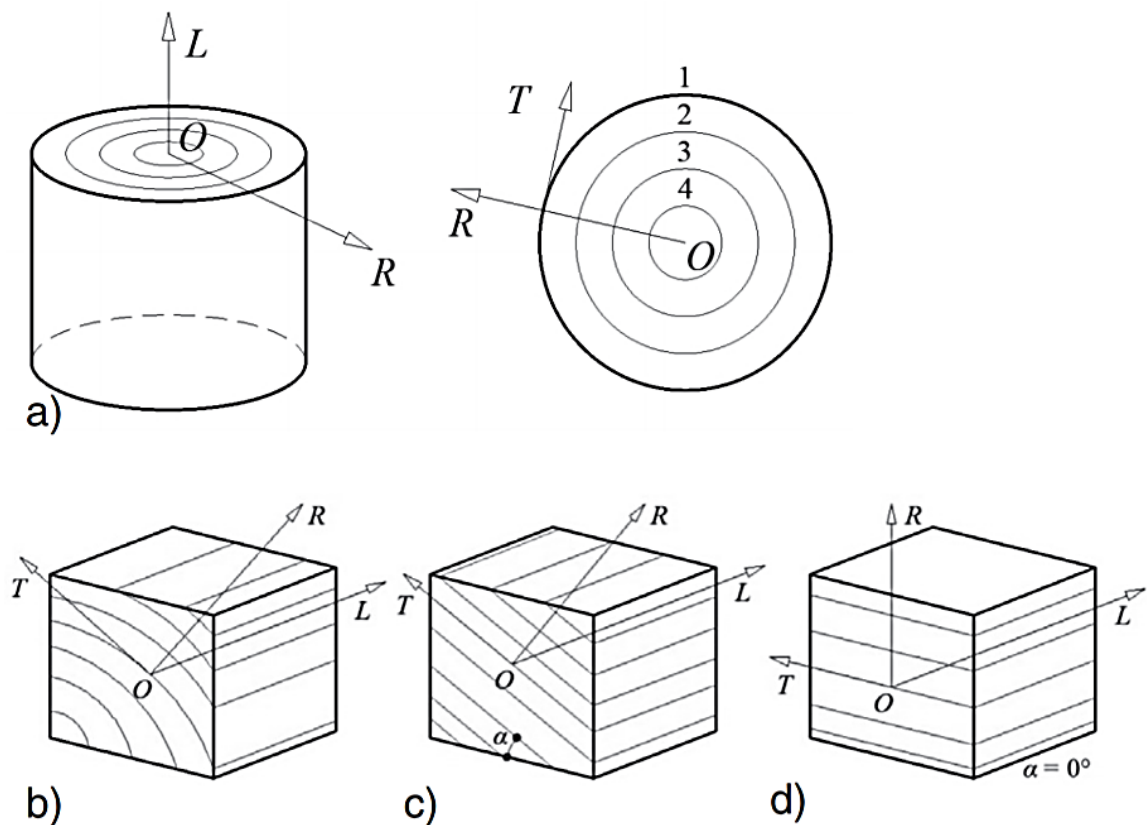
kde E je Youngův modul pružnosti [MPa];

ν Poissonův součinitel [-];

G modul pružnosti ve smyku rovině dle indexu [MPa].

3.7.4 Ortotropní elasticita dřeva

Ortotropní těleso je takové, jehož každým bodem prochází tři navzájem kolmé roviny symetrie elastických vlastností. Každým bodem takového tělesa prochází také tři hlavní, navzájem kolmé směry anizotropie. Uvažování dřeva jako ortotropního materiálu vyžaduje řadu předpokladů zjednodušujících popisovanou realitu. Materiálové vlastnosti dřeva vzhledem k jeho ortotropii materiálu ve směru vláken a kolmo na vlákna vyžadují definování lokálního válcového souřadného systému pro každý bod dřevěné konstrukce. Vzhledem ke kuželovitosti kmenu stromu je nejvhodnější využít válcový cylindrický souřadnicový systém. Dalším zjednodušením je však transformace parametrů válcového systému na systém pravoúhlý kartézský, který je s hlavními směry ortotropie znázorněn na obr. 37. Pozice osy L (podélný směr resp. směr růstu dřeva) znázorňuje orientaci ve směru vláken a osy R radiální⁸ a T tangenciální⁹ směry materiálové orientace v průřezové rovině [23], [24].



obr. 37 Souřadnicový systém LRT [24]

a) směry os vzhledem k letokruhům dřeva; b-d) způsoby modelování letokruhů dřeva

Experimenty např. Požgaj a kol. [25] byl ověřen předpoklad chování dřeva jako pružného materiálu s platností Hookeova zákona. Lineární materiálový model dřeva definuje devět nezávislých elastických konstant: Youngův modul pružnosti E_L , E_R , E_T , modul pružnosti

⁸ Radiální směr – směr kolmý na vlákna

⁹ Tangenciální – směr kolmý na letokruhy

ve smyku G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} a Poissonův součinitel příčné deformace ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} , které lze popsat v matici poddajnosti dle Hookova zákona vztahy

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{RT} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

$$\text{kde platí } \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}, \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}, \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \quad (28)$$

$$\text{odkud plyne: } \nu_{LR}\nu_{LT}\nu_{RT} = \nu_{RL}\nu_{TL}\nu_{TR} \quad (29)$$

kde E je Youngův modul pružnosti ve směru dle indexu [MPa];

ν Poissonův součinitel [-];

G modul pružnosti ve smyku rovině dle indexu [MPa].

Ze vztahů lze určit zbývající hodnoty Poissonových součinitelů ν_{RL} , ν_{TR} a ν_{LT} .

Při určování malých Poissonových součinitelů ν_{TL} a ν_{RL} je výpočet hodnot výhodný, vzhledem k obtížím jejich experimentálního určování. Při měření hodnot na dřevěném trámečku 100 x 100 x 100 mm poměrné protažení způsobí poměrnou deformaci v podélném směru tak nízkých hodnot, že při měření relativního protažení s přesností 1 %, je třeba měřit s přesností na 0,001 mm [23].

Experimentální určení konstant je problematické a časově i finančně velmi náročné. V případě experimentálního zjišťování konstant není zaručeno přesné stanovení jejich hodnoty vzhledem k různorodosti vlastností dřevěných prvků s uvažováním přirozených vad dřeva. Experimentální určování materiálových vlastností dřeva je popsáno v řadě publikací. Höring a Stamer stanovili pro smrkové dřevo konstanty [23]

$$E_L = 16600 \text{ MPa} \quad G_{LR} = 1780 \text{ MPa} \quad \nu_{LR} = 0,31 \quad (30)$$

$$E_R = 1120 \text{ MPa} \quad G_{RT} = 70 \text{ MPa} \quad \nu_{RT} = 0,465 \quad (31)$$

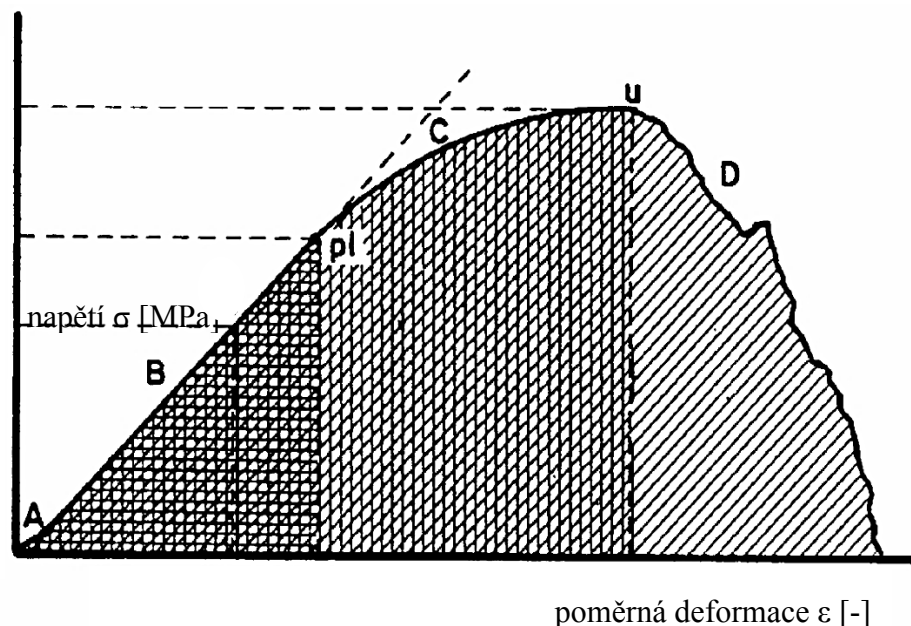
$$E_T = 580 \text{ MPa} \quad G_{TL} = 680 \text{ MPa} \quad \nu_{TL} = 0,011 \quad (32)$$

Odišné hodnoty ortotropních vlastností dřeva zařazeného do stejné pevnostní třídy C24 byly vyhodnoceny v práci Požgaj a kol. [25], který stanovil hodnoty parametrů v tab. 6, ve které jsou uvedeny další hodnoty materiálových vlastností nalezených v odborných publikacích.

V této práci byly použity hodnoty z ČSN EN 338 [26], která předepisuje materiálové vlastnosti dřeva dle tříd pevnosti. Z hodnot je patrné příčné izotropní chování dřeva. Hodnoty modulu pružnosti a modulu pružnosti ve smyku jsou v modelu uvažovány stejné v radiálním a tangenciálním směru.

3.7.5 Materiálová nelinearita

Na diagramu na obr. 38 je zobrazena nelineární závislost poměrné deformace ε na napětí σ . Pro modelování se pro zjednodušení výpočtu tlačенého nebo taženého prvku rovnoběžně s vlákny využívá idealizovaná závislost. Deformace vlivem zatížení tahovou silou rovnoběžně s vlákny lze rozdělit do čtyř částí. Rozlišuje se elastické a plastické chování materiálu. Lineární elastické vlastnosti dřeva s platností Hookova zákona jsou předpokladem pro celou oblast B. Po vytvoření prvních plastických deformací se uvažuje nelineární oblast C. Oblast plastických deformací je omezena mezí pevnosti, po které nastává oblast porušení D [23], [16].



obr. 38 Schématický pracovní diagram dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny [23]

A – počáteční vyrovnání nerovností povrchu testovaného vzorku

B – oblast lineárně elastická

C – oblast plastických deformací

D – oblast pro porušení zkušební vzorku

pl – počátek plastických deformací

u – mez pevnosti materiálu

3.7.6 Pružně-plastický materiálový model dřeva

Lineárně elastické modely dřeva jsou konzervativní. Plastické deformace nastávají již při nízkých hodnotách napětí.

Pružně-plastický model anizotropního materiálu lze popsat devíti konstantami pro elastickou část deformace a osmnácti pro plastickou. Popisem plastického chování ortotropního materiálu se zabývala řada studií. Milch [27] uvádí experimentálně stanovené konstanty pro popis plastických deformací smrkového dřeva v tab. 5. Zjišťovanými konstantami jsou mez elasticity σ_{yield} , plastický tangenciální modul $E_{tangent}$. Index c značí vlastnosti v tlaku a index t vlastnosti v tahu.

tab. 5 Materiálové vlastnosti popisující plastické chování dřeva [27]

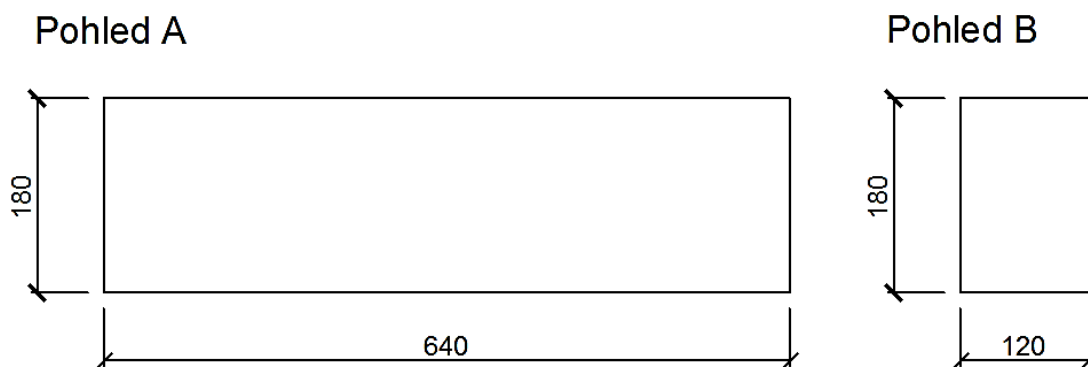
Směr	$\sigma_{yield,c}$ [MPa]	$E_{tangent,c}$ [MPa]	$\sigma_{yield,t}$ [MPa]	$E_{tangent,t}$ [MPa]	Směr	τ_{yield} [MPa]	$G_{tangent}$ [MPa]
L	49	140	49	140	LR	6,7	5,7
R	6,4	1,8	6,4	1,8	LT	3,1	4,7
T	7,1	2,3	7,1	2,3	RT	6,7	0,5

4 Analytický model

Pro verifikaci numerického modelu je připraven analytický model spoje a zjednodušený analytický model pro stanovení elastických deformací dřevěného tělesa s různými materiálovými vlastnostmi experimentálně stanovenými podle předchozích studií.

4.1 Zjednodušený analytický model

Pro devět navržených variant analytického modelu uvažujících lineárně elastické materiálové vlastnosti dřevěného prvku je sestaven výpočet poměrných deformací. Zatížení představuje tahová koncentrovaná síla rovnoběžně s vlákny dřevěného prvku. Tento analytický model slouží k porovnání se zjednodušeným numerickým modelem v programu ABAQUS. Analytický model je definován vztahy v kapitole 3.7.3. Vzorek má geometrii kvádrů rozměrů 180 x 120 x 640 mm, viz obr. 39.



obr. 39 Schéma zjednodušeného modelu 180x120x640 mm

Podle normy ČSN EN 338 [26] má jehličnaté dřevo třídy pevnosti C24 pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny $f_{t,0,k}$ hodnoty 14 MPa.

Pro označení konstant materiálových vlastností dřeva jsou uváděny hodnoty kartézského souřadnicového systému LRT, který využívá řada výpočetních softwarů. Z popisu souřadnicového systému v kapitole 3.7.3 vyplývá, že po převedení do souřadnicového systému X, Y, Z platí pro osy vztahy $X = L$, $R = Y$ a $T = Z$.

Stanovení materiálových vlastností pro sestavení matice poddajnosti ortotropního materiálu je velice komplikované a náročné. Experimentálnímu zjišťování těchto materiálových konstant se věnovala řada studií, výsledky z vybraných vědeckých publikací jsou uvedeny v tab. 6. Na základě hodnot získaných z těchto publikací bylo navrženo zmíněných devět variant zjednodušeného modelu pro ověření elastických deformací dřevěného tělesa v programu ABAQUS. V analytickém modelu byla vlivem působení centrické tahové síly uvažována pouze změna modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny.

tab. 6 Konstanty elastických materiálových vlastností převzatých z odborné vědecké literatury

Model	Zdroj	E_L [MPa]	E_R [MPa]	E_T [MPa]	G_{LR} [MPa]	G_{LT} [MPa]	G_{RT} [MPa]	ν_{LR} [-]	ν_{LT} [-]	ν_{RT} [-]
Z1	[25]	13650	789	289	573	474	53	0,023	0,014	0,687
Z2	[28]	13200	820	430	660	730	40	0,028	0,015	0,24
Z3	[27]	17850	352	289	573	474	53	0,023	0,014	0,557
Z4	[29]	11000	370	370	690	690	60	0,48	0,48	0,22
Z5	[30]	10800	842	464	691	659	32	0,372	0,467	0,435
Z6	[23]	16600	1120	580	1780	680	70	0,31	0,011	0,465
Z7	[31]	10500	900	500	750	720	39	0,37	0,47	0,43
Z8	[32]	12000	900	500	700	700	40	0,038	0,015	0,558
Z9	[33]	10991	716	435	724	557	28	0,42	0,48	0,5

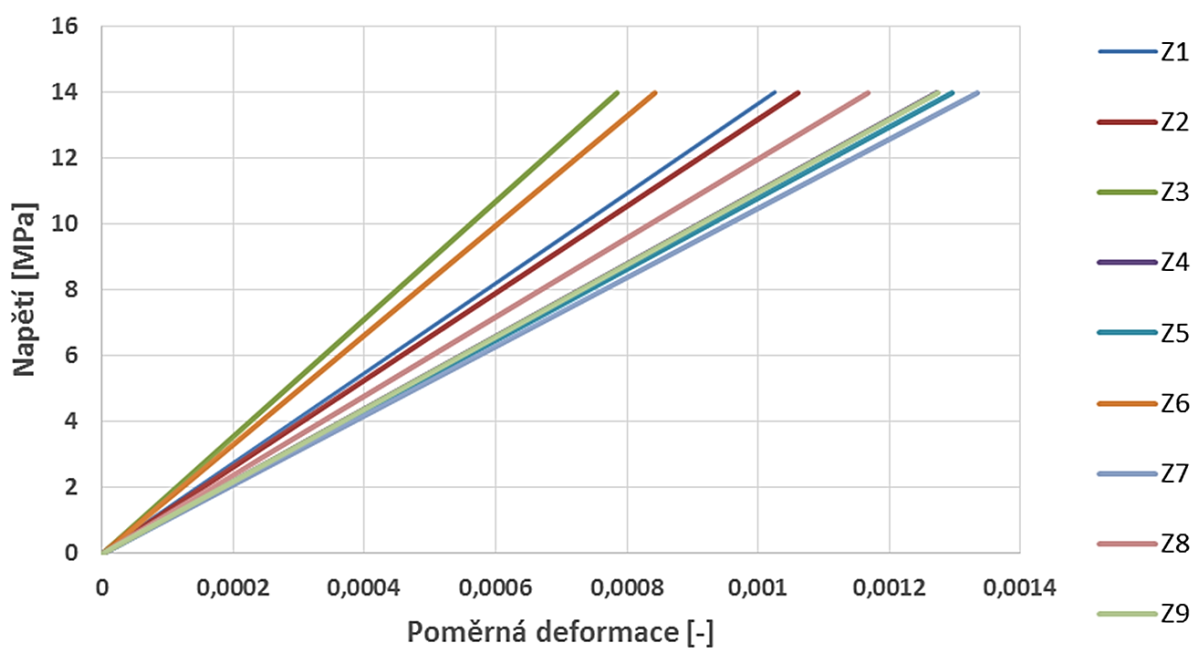
Z výsledků studií je patrný rozptyl materiálových vlastností. Modely dřevěného materiálu vykazují rozptyl v hodnotách modulu pružnosti v podélném směru vláken, který má na deformace od tahového namáhání rovnoběžně s vlákny významný vliv. Výsledné deformace numerického modelu s analytickým se stejnými materiálovými vlastnostmi prokazují dobrou shodu.

Ze vztahu pro výpočet normálového napětí, viz rovnice 25, byla v závislosti na průřezové ploše tělesa stanovena síla působící při předpokládaném porušení, tedy dosažení hodnoty pevnosti v tahu v dřevěných vláknech. Tato síla dosahuje hodnoty 302,4 kN. Zjednodušený model dřevěného tělesa byl poté zatížen touto stanovenou silou. Po provedení výpočtu byla stanovena hodnota deformace celého tělesa a porovnána s hodnotou deformace stanovenou analytickým výpočtem.

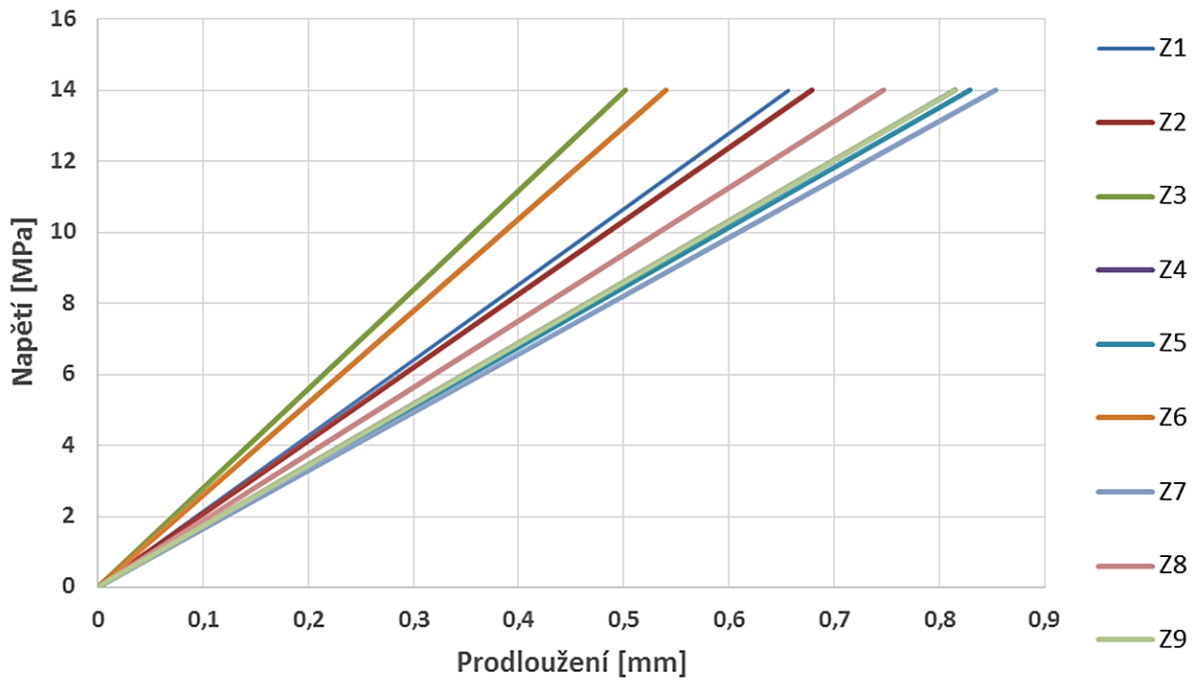
Výsledné hodnoty poměrných deformací a prodloužení dřevěného prvku jsou uvedeny v tab. 7 a graficky znázorněny na obr. 40 a obr. 41. Deformace dosahují hodnot v rozsahu mezi 0,656 a 0,853 mm dle hodnoty uvažovaného modulu pružnosti rovnoběžně se směrem vláken. Při působení dané síly by mělo docházet k totožným deformacím, které byly stanoveny analytickým výpočtem.

tab. 7 Výsledné hodnoty poměrné deformace z analytického modelu

Model	E_L [MPa]	$f_{t,0,k}$ [MPa]	ε [-]	I_0 [mm]	ΔI [mm]	L [mm]
Z1	13650	14	0,001026	640	0,656	640,656
Z2	13200	14	0,001061	640	0,679	640,680
Z3	17850	14	0,000784	640	0,502	640,502
Z4	11000	14	0,001273	640	0,815	640,815
Z5	10800	14	0,001296	640	0,830	640,830
Z6	16600	14	0,000843	640	0,540	640,540
Z7	10500	14	0,001333	640	0,853	640,853
Z8	12000	14	0,001167	640	0,747	640,747
Z9	10991	14	0,001274	640	0,815	640,815



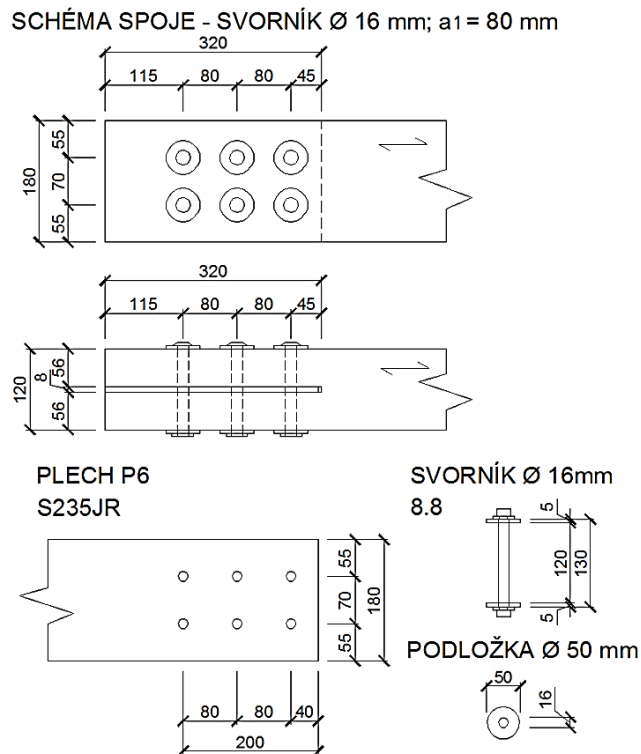
obr. 40 Grafické znázornění výsledných hodnot poměrných deformací ze zjednodušeného analytického modelu



obr. 41 Grafické znázornění výsledných hodnot prodloužení ze zjednodušeného analytického modelu

4.2 Analytický model spoje

Pro navržené experimentální spoje, popsané v kapitole 7, je vytvořen analytický model v programu Excel Microsoft office. Analytický a numerický model řeší připravovaný experimentální spoj č. 1, viz obr. 42.



obr. 42 Schéma vzorků 1

V této kapitole je určen analytický výpočet únosnosti spojů dle příslušné normy ČSN EN 1995-1-1 [14], který je podrobněji popsán v předchozích kapitolách 3.5.1 a 3.5.2. Postup výpočtu únosnosti spojů č. 1 a 2 uvádí tab. 8.

tab. 8 Výpočet únosnosti spoje ocel-dřevo se skupinou svorníků - vzorek č.1 a 2

Počáteční parametry:										
svorník	M16	8.8	dřevo	C24		počet svorníků v řadě	úhel	min. rozteč		
d [mm]	f_{uk} [MPa]		ρ_k [kg/m ³]	t_1 [mm]		n [-]	α [°]	$a_{1,min}$ [mm]	a_1 [mm]	
16	800		350	56		3	0	80	80	
počet řad		počet stříhů				char. únosnost na vytažení spoj. prostředku				
[-]		[-]		γ_M [-]	k_{mod} [-]	$F_{ax,Rk}$ [N]				
2		2		1,3	0,9	0				
Charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti										
$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} =$						324282	Nmm			
Charakteristická hodnota pevnosti v otláčení										
$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} / (k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) =$						24,108	N/mm ²			
$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k =$						24,108	N/mm ²			
$k_{90} =$		jehličnaté		$1,35 + 0,015 d$		1,59				
		LVL		$1,30 + 0,015 d$						
		listnaté		$0,90 + 0,015 d$						
Charakteristická únosnost svorníků pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku (dle způsobu porušení)										
$F_{v,Rk} = \min:$										
$f_{h,1,k} t_1 d =$						21601	N			
$f_{h,1,k} t_1 d (v(2 + 4M_{y,Rk} / (f_{h,1,k} d t_1^2) - 1) + F_{ax,Rk} / 4) =$						16261	N			
$2,3 v(M_{y,Rk} f_{h,1,k} d) + F_{ax,Rk} / 4 =$						25723	N			
Návrhová únosnost jednoho svorníku pro jeden stříh										
$F_{v,Rd} = (k_{mod} * F_{v,Rk}) / \gamma_M =$						11258	N			
Účinný počet svorníků v jedné řadě										
$n_{ef} = \min:$										
n						3				
$n^{0,9} (a_1 / 13d)^{0,25} =$						2,1167				
Celková charakteristická únosnost spoje										
$F_{Rk} = F_{v,Rk} * \text{počet řad svorníků} * \text{počet stříhů} * n_{ef} =$						137682	N			
						138	kN			
Celková návrhová únosnost spoje										
$F_{Rd} = F_{v,Rd} * \text{počet řad svorníků} * \text{počet stříhů} * n_{ef} =$						95318	N			
						95	kN			

5 Numerický model

Pro modelování byl zvolen program ABAQUS FE verze 6.14 v prostředí ABAQUS/Standard společnosti Dassault Systèmes. V programu byly vytvořeny modely experimentálních vzorků pro simulaci zatížení působícího na vzorky během zkoušek. Modelování probíhalo podle přehledného manuálu programu ABAQUS [34].

Program nabízí řadu produktů. Pro vytvoření modelu slouží preprocessing ABAQUS/CAE¹⁰, který tvoří grafické prostředí programu. Tvoří se zde geometrie modelu, stanovují se materiálové vlastnosti, zatěžovací kroky, zatížení, výpočetní síť a nastavují se zde parametry úlohy. Následně vygeneruje Input soubor s koncovkou *.inp, který je načten do řešiče programu, tedy části programu sloužící k provedení výpočtu. Výpočet běží na pozadí a v závislosti na typu úlohy je k výpočtu používán ABAQUS/Standard nebo ABAQUS/Explicit. Výpočet popsáný v práci proběhl v prostředí ABAQUS/Standard, které je určené pro řešení statických a nízkorychlostních dynamických úloh. Prostředí ABAQUS/Explicit bývá aplikováno na části analýzy, ve kterých převažují úlohy vysokorychlostní, nelineární a s přechodnou odezvou. Výsledky výpočtu jsou poté uloženy do souboru s koncovkou *.odb, který je možné načíst opět do postprocessingu ABAQUS/CAE pro následnou vizualizaci výsledků [35].

Tato část práce se podrobně zabývá modelováním vzorku značeného číslem 1 popsáného v kapitole 7.2. Jedná se o spoje tvořené rostlým dřevem a ocelovým plechem spojených šesti svorníky M16 ve vzájemných roztečích hodnoty 80 mm. Řešené vzorky tvoří prvky totožných rozměrů a vlastností s výjimkou hustoty dřevěných prvků, proto je v následující kapitole popsán numerický model vzorku číslo 1. Numerické modely byly tvořeny ve snaze o co nejpřesnější simulaci mechanických a materiálových charakteristik reálných zkušebních vzorků. Definované vstupní parametry jednotlivých materiálů byly experimentálně zjišťovány nebo převzaty z odborné literatury, jejíž poznatky byly ověřeny na dříve uskutečněných experimentech. Dřevěné prvky byly v programu modelovány bez uvažování rozdílů materiálových vlastností jarních a letních letokruhů.

Program ABAQUS provádí výpočet pomocí metody konečných prvků a poskytuje výkonná a kompletní řešení pro rutinní i sofistikované technické problémy pokrývající široké spektrum průmyslových aplikací. Do vytvořeného 3D modelu byly zadávány hodnoty materiálových vlastností, vlastnosti kontaktních ploch mezi prvky vzorku a mechanické zatížení. Přenos vlhkosti se skládá z průtoku vlhkosti ze vzduchu do povrchu dřeva a difúze vlhkosti ve dřevě. Pro popsání obsahu vlhkosti ve dřevu lze do programu ABAQUS implementovat podprogram DFLUX, ve kterém se provádí analýza pro proměnné hodnoty zatížení a vlhkosti [36].

¹⁰ CAE = Complete Abaqus Enviroment, tvořící grafické prostředí programu

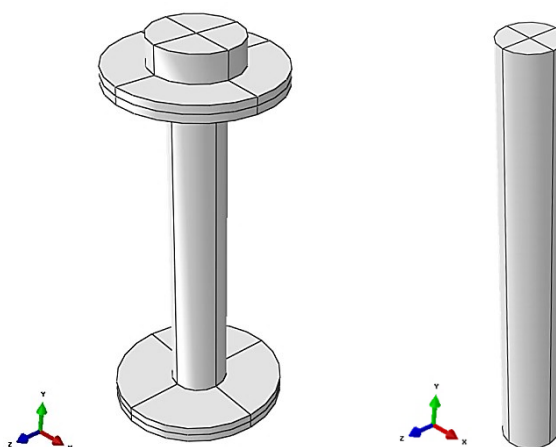
V současné době nejsou v programu ABAQUS k dispozici implementované modely dřeva. Program však využívá několik podprogramů v jazyce FORTRAN, které umožňují definovat svůj vlastní materiálový model. V programu lze pro prvek definovat geometrii, okrajové podmínky, vlastnosti materiálu mechanické a vlhkostní, zatížení a výpočetní síť modelu. Chování dřevěného prvku během mechanického zatěžování a při změnách vlhkosti v čase bylo popsáno pomocí reologického modelu dřeva implementovaným podprogramem UMAT. Pro budoucí zdokonalení numerického modelu bude zapotřebí v programech Intel Visual Fortran 12.0 a Visual Studio 2010 definovat přesné materiálové vlastnosti dřevěného prvku a propojit s programem. Program vykreslí porušení řešeného spoje. Vytvoření podprogramu bude nutné pro definování vzniku plastických deformací modelu dřevěného prvku, bez toho doplňku je možný pouze výpočet s elastickými materiálovými konstantami. Vzhledem k náročnosti definování parametrů pomocí programovacího jazyka a komplikacím doprovázejících zajišťování odpovídající licence k legálnímu užívání programu Intel Visual Fortran, byl pro výpočet definován zjednodušený model popsaný v následující kapitole. Numericky modelovaný dřevěný prvek byl definován lineárně pružnými vlastnostmi ortotropního materiálu blíže popsaného v kapitole 3.7.3 [36].

5.1 Numerický model spoje

Kapitola je věnována přiblížení postupu numerického modelování v programu ABAQUS.

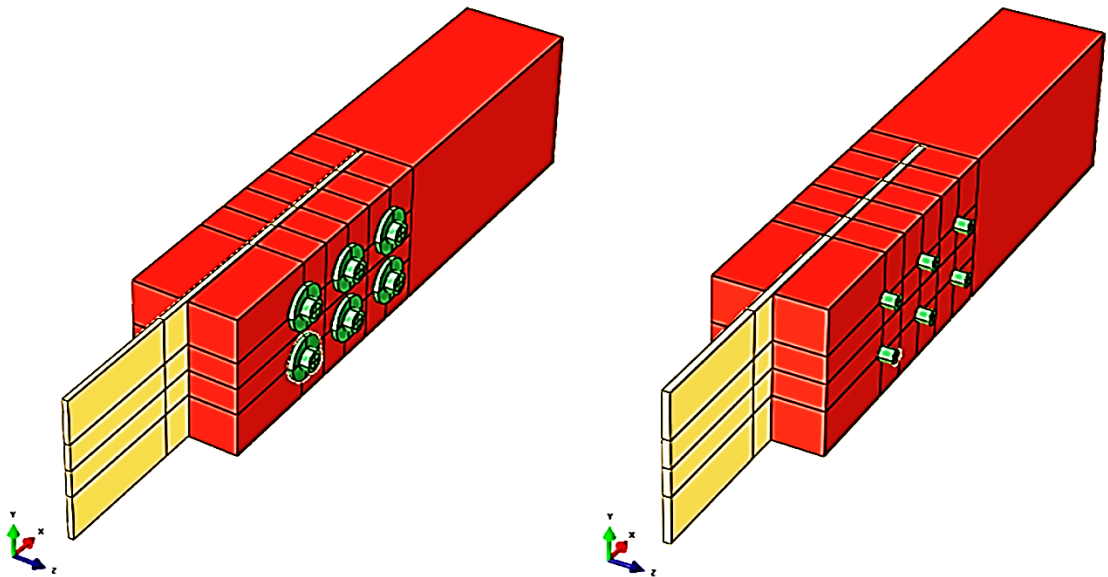
5.1.1 Geometrie spoje

Do programu byla nejdříve v modulu Part pomocí souřadnicového systému zadána geometrie jednotlivých prvků vzorku shodná s analytickým modelem. Plech a dřevěný prvek byly modelovány s předvrtanými otvory dle schémat v kapitole 3.2. Otvor ve dřevěném prvku byl modelován stejně jako v reálném vzorku průměru svorníku. Svorníky byly nejdříve modelovány včetně odpovídajících příložek a matic. Pro zjednodušení výpočtu byla geometrie svorníků zjednodušena odstraněním příložek a matic. Úprava je znázorněna na obr. 43.

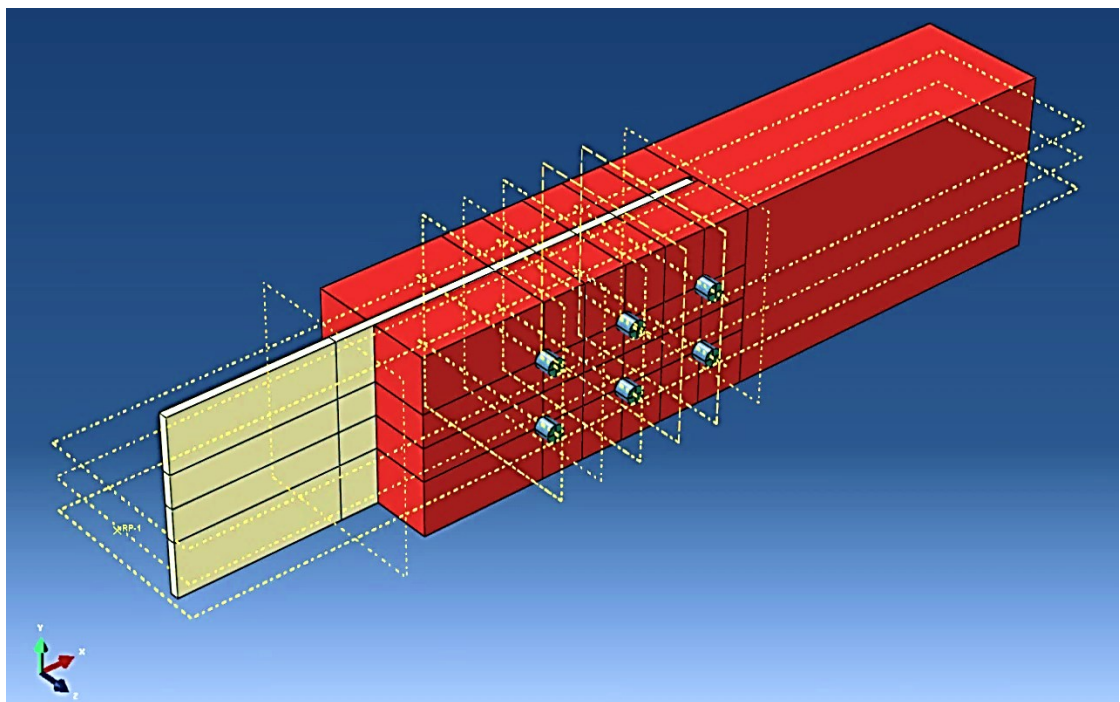


obr. 43 Schéma svorníkových spojovacích prostředků v programu ABAQUS:
vlevo – schéma skutečné podoby; vpravo - zjednodušená podoba

Dalším krokem bylo vytvoření sestavy instancí v modulu Assembly. Zde byla vytvořena konstrukce spoje z jednotlivých prvků. Porovnání celkového zjednodušeného modelu s modelem, který obsahuje pouze dřívky svorníků se zavedenými podporami je znázorněno na obr. 44. Pro možnost zadání zatížení a zjištění deformací v důležitých bodech byly zadány roviny pomocí příkazu Datum plane. Pomocí vytvořených rovin byl model rozdělen na buňky Cels. Zjednodušené svorníky byly rozděleny na čtyři buňky podle os symetrie. Ocelový plech a dřevěný prvek byly rozděleny v místech vložených svorníků a dřevěný prvek dále v místě ukončení ocelového plechu. Roviny jsou znázorněny na obr. 45 přerušovanou žlutou čarou.



obr. 44 Porovnání skutečné podoby vzorku č.3 se zjednodušenou podobou:
vlevo - schéma skutečné konstrukce; vpravo - zjednodušená podoba



obr. 45 Znázornění rovin Datum plane na vzorku č. 3

5.1.2 Materiálové vlastnosti

Dále byly definovány materiálové vlastnosti. V části Property byly přiřazeny ocelovému plechu a svorníkům materiálové vlastnosti isotropního materiálu. Dřevěnému prvku jsou přiřazeny vlastnosti popsané v kapitole 3.7. Vzhledem k různé směrové orientaci materiálových vlastností byl elementům dřevěného prvku zadán lokální pravoúhlý souřadnicový systém s přiřazenými konstantami matice poddajnosti uvedených v tab. 9. Další zadávanou materiálovou vlastností dřeva byla hustota, jejíž hodnota byla stanovena během experimentů jako 430 kg/m^3 .

tab. 9 Hodnoty elastických materiálových vlastností dřevěného prvku

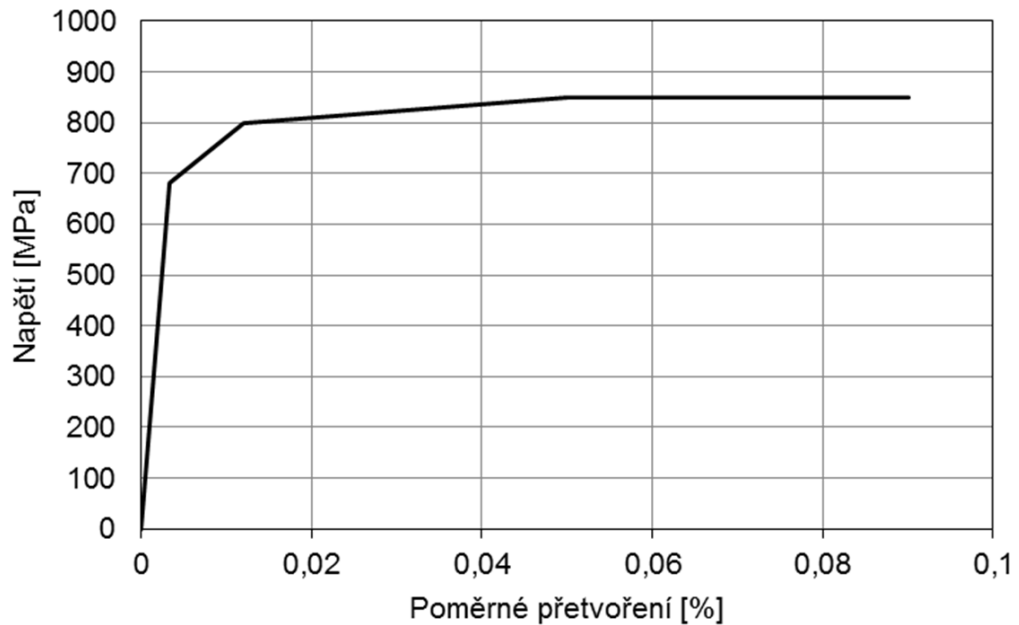
Modelu pružnosti [MPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Poissonova konstanta [-]
$E_L = 11000 \text{ MPa}$	$G_{LR} = 690 \text{ MPa}$	$\nu_{LR} = 0,04$
$E_R = 370 \text{ MPa}$	$G_{TL} = 690 \text{ MPa}$	$\nu_{TL} = 0,04$
$E_T = 370 \text{ MPa}$	$G_{RT} = 50 \text{ MPa}$	$\nu_{RT} = 0,4$

Ocelový prvek a svorníky byly modelovány s elastickými hodnotami Poissonova součinitele $\nu_{ocel} = 0,3$ a Youngova modulu pružnosti $E_{ocel} = 210000 \text{ MPa}$. Rozměry prvků jsou do programu zadávány v mm, proto hodnoty modulu pružnosti a modulu pružnosti ve smyku jsou zadány v jednotkách MPa. Hustota ocelových prvků činí 7850 kg/m^3 , do programu byla zadávána v jednotkách t/mm^3 . Materiálové vlastnosti definující plastickou část pracovního diagramu ocelových prvků byly zadávány formou textového příkazu.

Hodnoty v pracovním diagramu vyjadřující závislost poměrného přetvoření na napětí oceli svorníků jsou převzaty z práce Gödrich [22]. Významné body zmíněného zjednodušeného pracovního diagramu oceli 8.8 uvádí tab. 10. Hodnoty jsou graficky znázorněny na obr. 46. Z uvedených experimentálně stanovených hodnot je patrné uvažování plastické deformace svorníků s hodnotami závislými na dosaženém napětí.

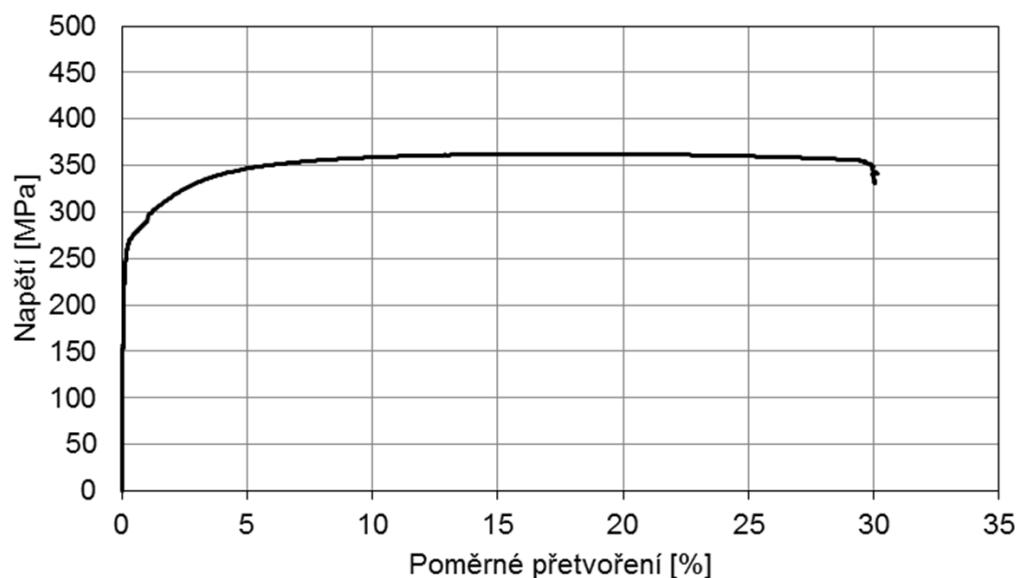
tab. 10 Významné body pracovního diagramu oceli 8.8 [22]

Normálové napětí [MPa]	Celkové přetvoření [-]	Plastická část přetvoření [-]
680	0,0033	0
800	0,0120	0,0081
850	0,0500	0,0459
850	0,0900	0,0859



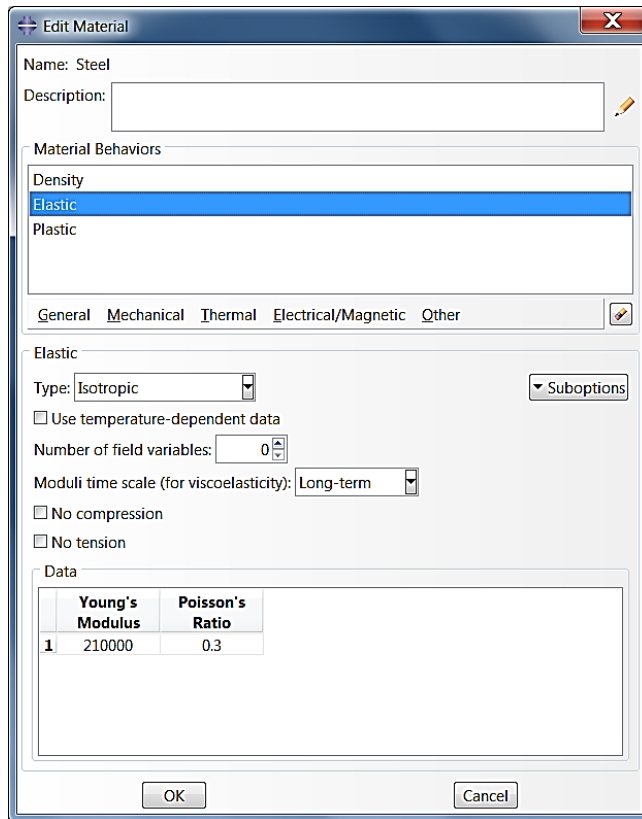
obr. 46 Zjednodušený pracovní diagram oceli 8.8

Ocelový plech byl modelován s pracovním diagramem na obr. 47 podle tahových zkoušek ocelového prvku stejné meze kluzu. Materiálový model byl zvolen vzhledem k předpokládanému způsobu přetvoření ocelových prvků s uvažováním zpevnění materiálu. Pro budoucí úpravy numerického modelu se plánují tahové zkoušky oceli konstrukce spoje. Do programu byla zadána vzestupná část pracovního diagramu před dosažením meze pevnosti.

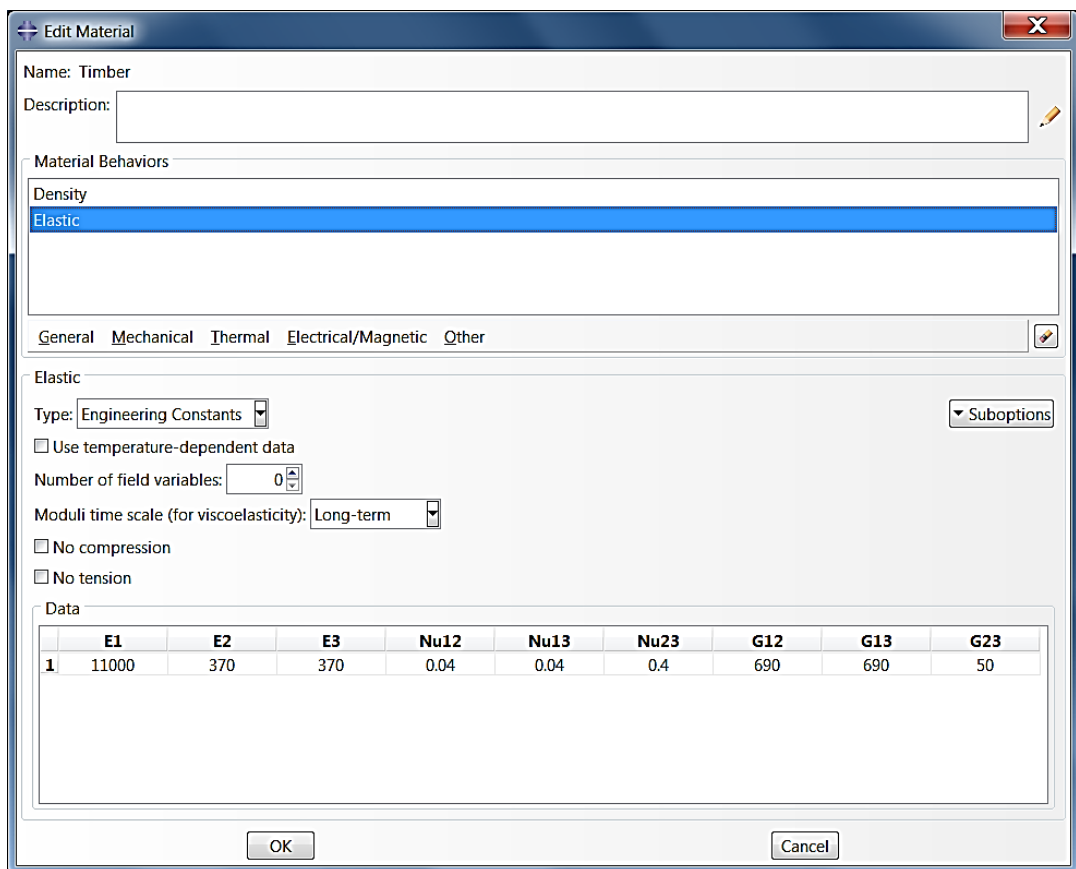


obr. 47 Pracovní diagram oceli S235JR

Materiálové isotropní vlastnosti ocelových prvků definované v programu ABAQUS jsou na obr. 48. Zadávání ortotropní elasticity dřeva v programu je na obr. 49.



obr. 48 Materiálové vlastnosti v programu ABAQUS pro ocel



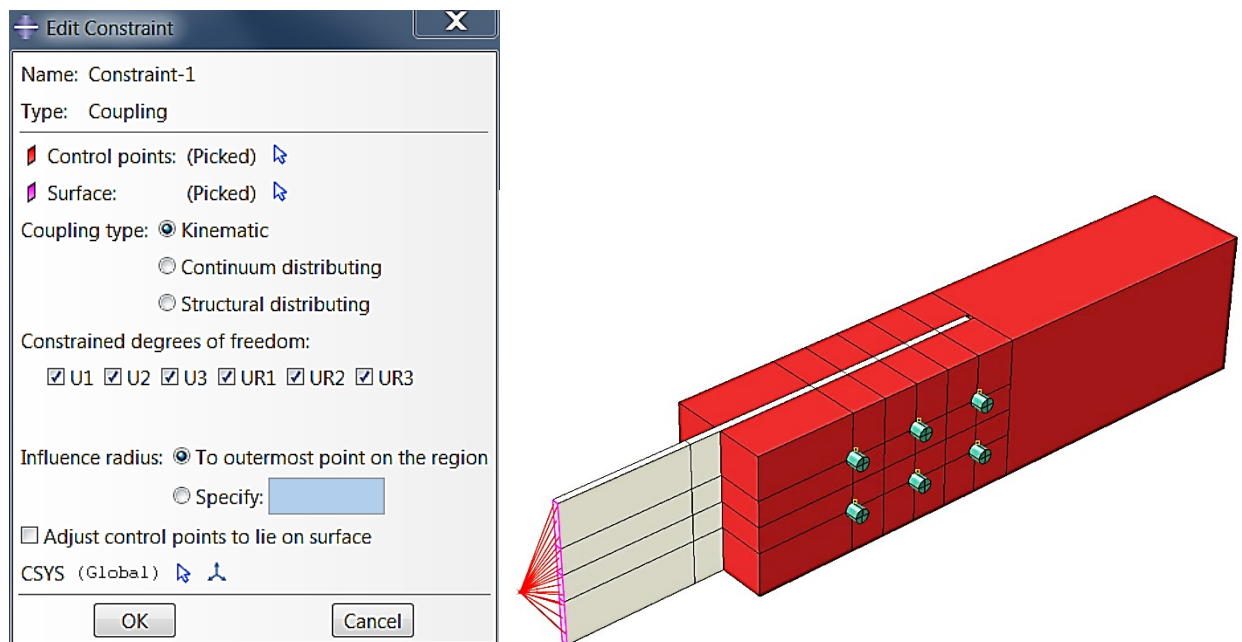
obr. 49 Materiálové vlastnosti v programu ABAQUS pro dřevo

5.1.3 Zatížení

Hlavy a matice svorníků byly modelovány zabráněním posunu ve směru osy z, směru osy svorníku. Během zatěžování dochází k deformacím vedoucím k prodloužení dřívku svorníku a následné vůli pro rozevření dřevěného prvku ve směru osy svorníku. Protože nelze stanovit prodloužení dřívku svorníku, byl svorník uvažován jako dřík, který umožní rozevření dřevěného prvku. Zjednodušení nemá na posuny v kolmém směru výrazný vliv.

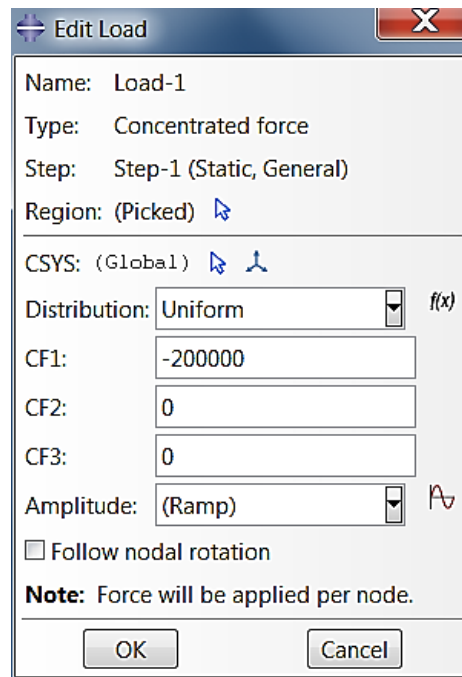
Podmínky výpočtu v modulu Step byly stanoveny jako statické nelineární s uvažováním velkých deformací. Výpočtový krok Initial slouží k zadání okrajových podmínek a interakce. V zatěžovacím kroku Step-1 pak byla zadána samotná zatížení spoje během experimentů.

Pro vložení interakcí byl v modulu Interaction nejdříve definován referenční uzel RP-1 a do něj zavedena působící síla. Pomocí nelineární vazby Coupling byla čelní průřezová plocha ocelového plechu virtuálně propojena s referenčním bodem. Parametry vazby zajišťující rovnoměrné přenesení zatížení s referenčním uzlem RP-1 jsou popsány na obr. 50.



obr. 50 Parametry vazby Coupling se schématickým znázorněním polohy

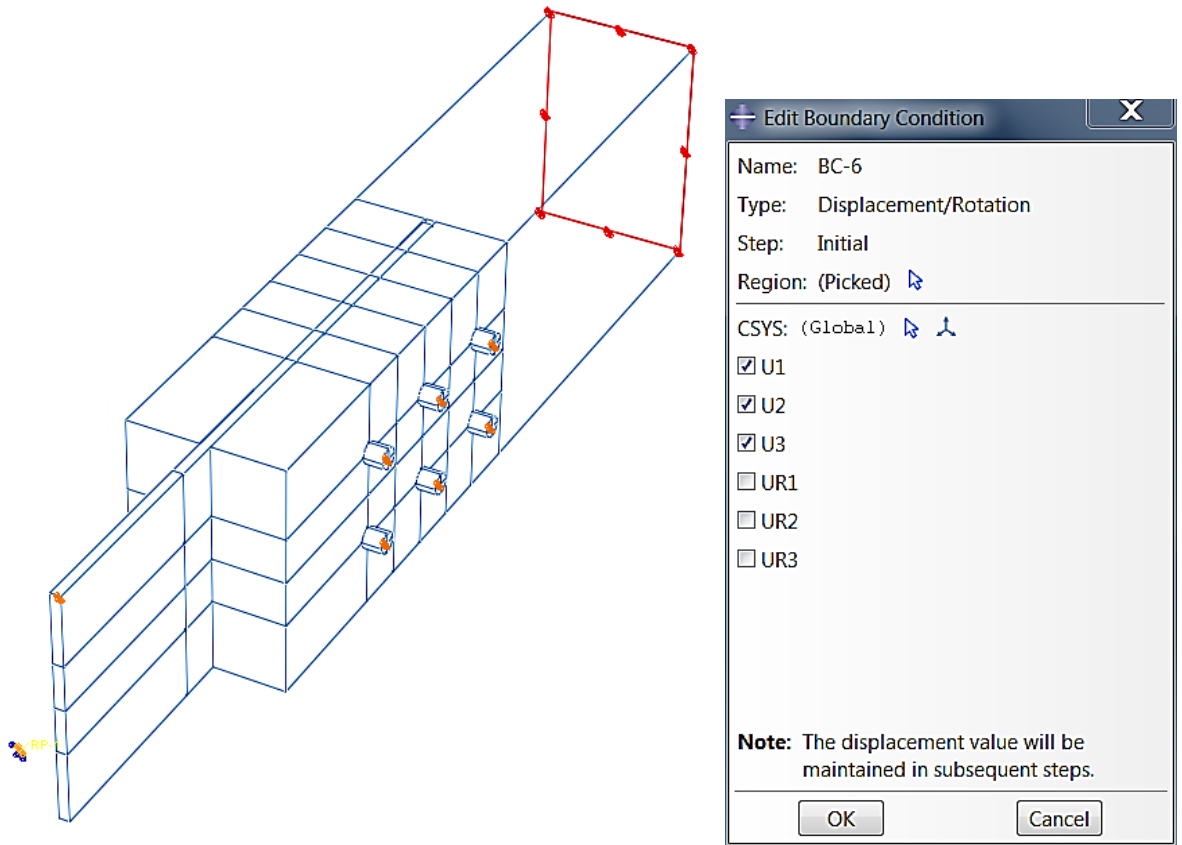
V modulu Load byla vzorku definována koncentrovaná tahová síla 200 kN. Síla, která překračuje hodnotu maximální předpokládané únosnosti spoje stanovené z analytického modelu. Parametry zadané síly jsou uvedena na obr. 51. Síla byla ve výpočtu uvažována pouze ve výpočtovém kroku Step-1 se zápornou hodnotou vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému.



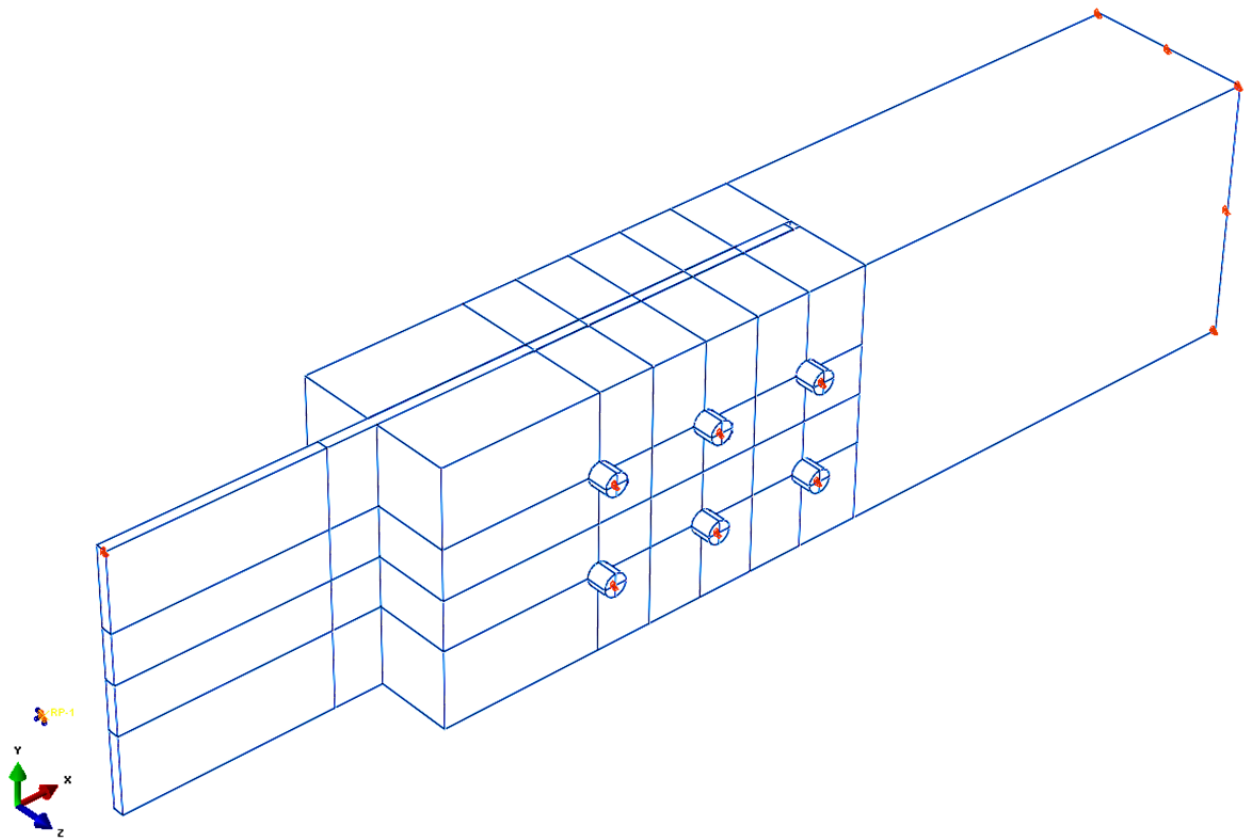
obr. 51 Parametry zatěžovací tahové síly působící v referenčním bodu RP-1

Ve výpočetním kroku Initial byla prostorová stabilizace spoje zajištěna definovanými podepřeními pro každý prvek konstrukce. Referenčnímu bodu RP-1, ocelovému plechu a čepům každého svorníku bylo zadáno pouze v tomto výpočetním kroku podepření zabraňující posunu ve všech směrech s umožněním jejich pootočení vůči všem souřadnicovým osám. Rozmístění podepření je s uvedenými parametry znázorněno na obr. 52. Dřevěný prvek byl modelován pouze délky 640 mm a zbylá část trámu byla nahrazena podporou stejných parametrů jako ostatním podporám ve výpočetním kroku Initial. Statické schéma spoje definované v počátečním výpočetním kroku je patrné z obr. 53.

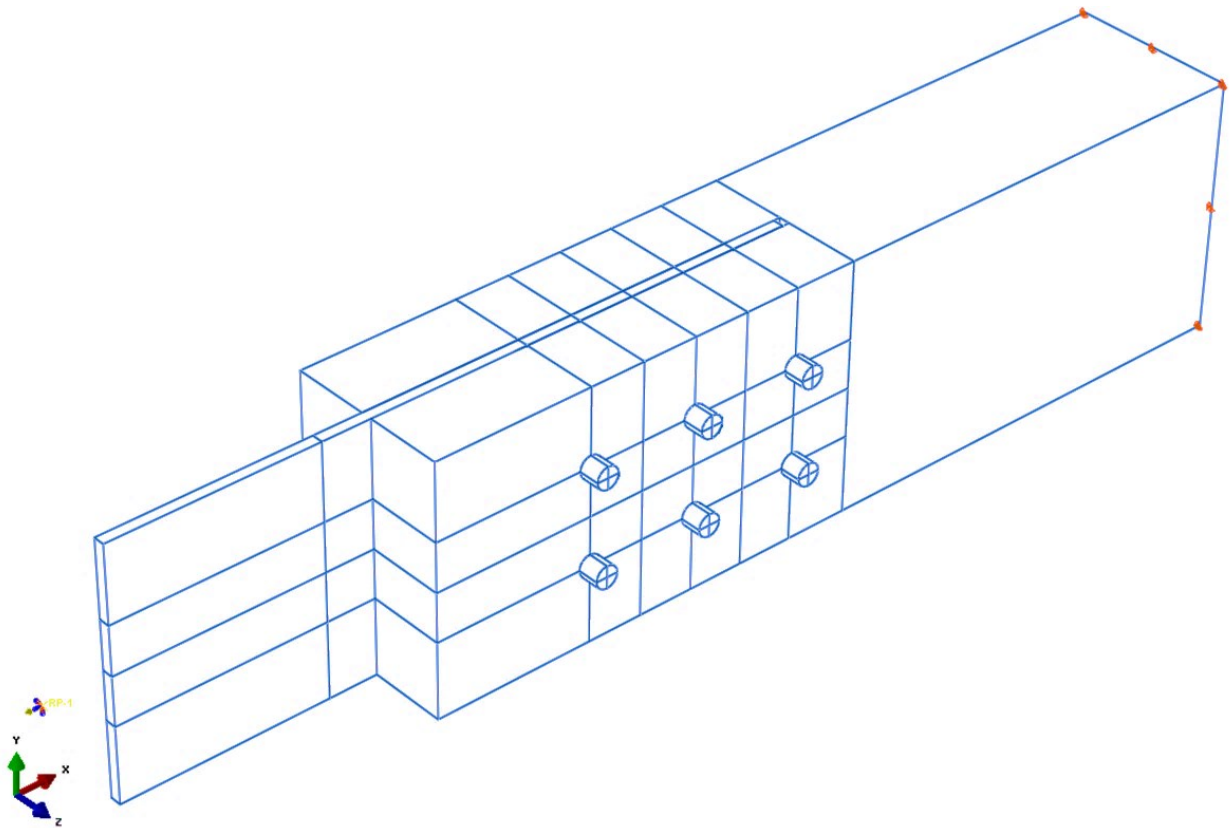
Parametry podepření byly změněny ve výpočetním kroku Step-1, který slouží ke snaze o co nejvěrnější napodobení statického schéma reálně navrhovaných konstrukcí. V tomto kroku výpočtu již nebyly zapotřebí podpory umístěné přímo na ocelovém plechu a čepch svorníků. Podpoře zajišťující vetknutí dřevěného prvku byla nastavena aktivita z předchozího výpočetního kroku se stejnými statickými parametry. Referenčnímu bodu RP-1 byl umožněn pouze posun ve směru rovnoběžně se směrem působící zatěžovací síly, tedy ve směru osy x , viz obr. 54.



obr. 52 Parametry podepření definovaného pouze v kroku Initial



obr. 53 Schéma rozmístění červeně vyznačeného podepření – krok Initial

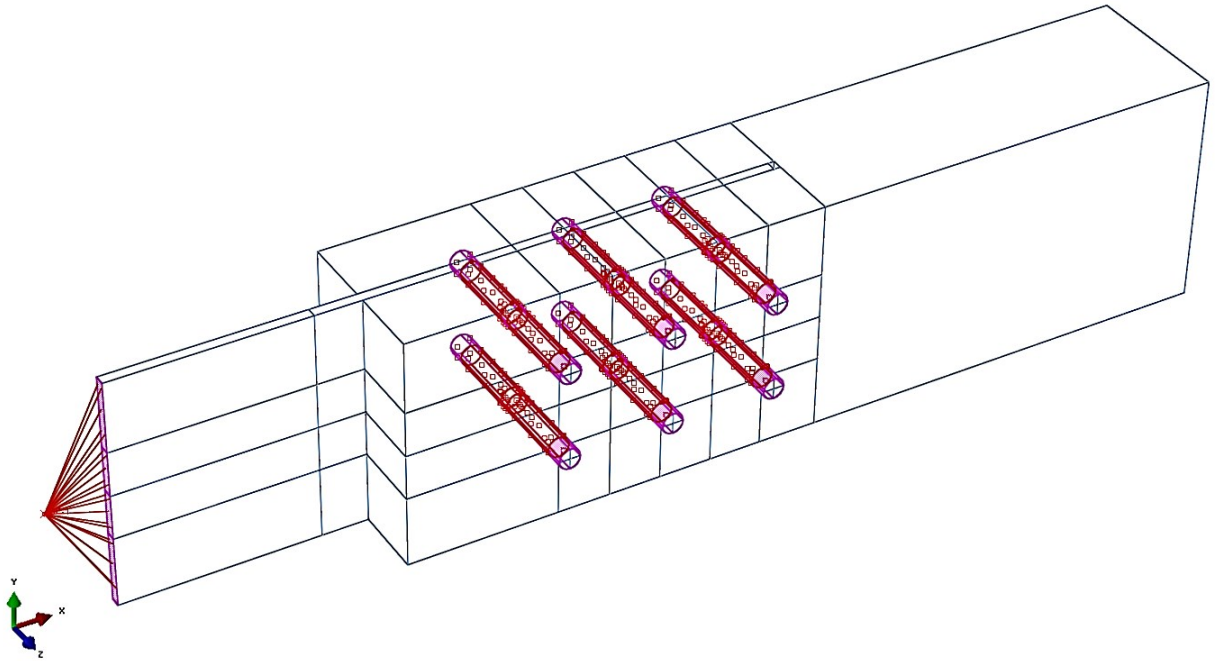


obr. 54 Schéma rozmístění červeně vyznačeného podepření - krok Step-1

5.1.4 Kontaktní vazby

Kontaktní vazby byly definovány mezi svorníky a dřevěným prvkem, dále mezi svorníky a ocelovým plechem, viz obr. 55. Pomocí vazeb se stanovují parametry vzájemného chování jednotlivých částí spoje. Bylo nutné definovat plochám parametry řídicí plochy Master a podřízené plochy Slave a mezi nimi vytvořena kontaktní vazba. Parametry Master plochy byly přiřazeny plochám dřevěného prvku a ocelového plechu v oblasti dříku svorníku. Plochy Slave byly zadány pro vnější povrch dříku svorníku. Diskretizační metodou byla zvolena metoda Surface to surface, která je blíže specifikována na obr. 56. Tato metoda je běžně navrhována pro simulaci otláčování otvoru v místě svorníků. Po zadání více variant vlastností interakčního kontaktu byl zvolen Hard-contact, který je definován pro kontakt s konečným posunem. Parametry kontaktu jsou uvedeny na obr. 57. Kontaktním párům byly definovány vlastnosti tangenciálního kontaktu s koeficientem tření hodnoty 0,2, viz obr. 58. Tření mezi ocelovým plechem a dřevěným prvkem nebylo vzhledem k navržené mezeře mezi prvky uvažováno.

V případě modelu vzorku č.1 se šesti navrženými svorníky bylo přiřazeno 18 kontaktních vazeb mezi jednotlivými plochami dotyku svorníků s dřevěným prvkem a svorníků s ocelovým plechem. Dřevěný prvek byl v místě vložení svorníků rozdělen výřezem na dvě části, proto ke každému svorníku náleží dvě kontaktní vazby s dřevěným prvkem.



obr. 55 Schéma vyznačených kontaktních vazeb mezi prvky v numerickém modelu

Edit Interaction

Name: CP-1-Bolt-1-Plate-1
 Type: Surface-to-surface contact (Standard)
 Step: Initial

Master surface: CP-41-Bolt-1
 Slave surface: CP-75-Plate-1

Sliding formulation: Finite sliding Small sliding
 Discretization method: Surface to surface
 Exclude shell/membrane element thickness
 Degree of smoothing for master surface: 0.2
 Use supplementary contact points: Selectively Never Always
 Contact tracking: Two configurations (path) Single configuration (state)

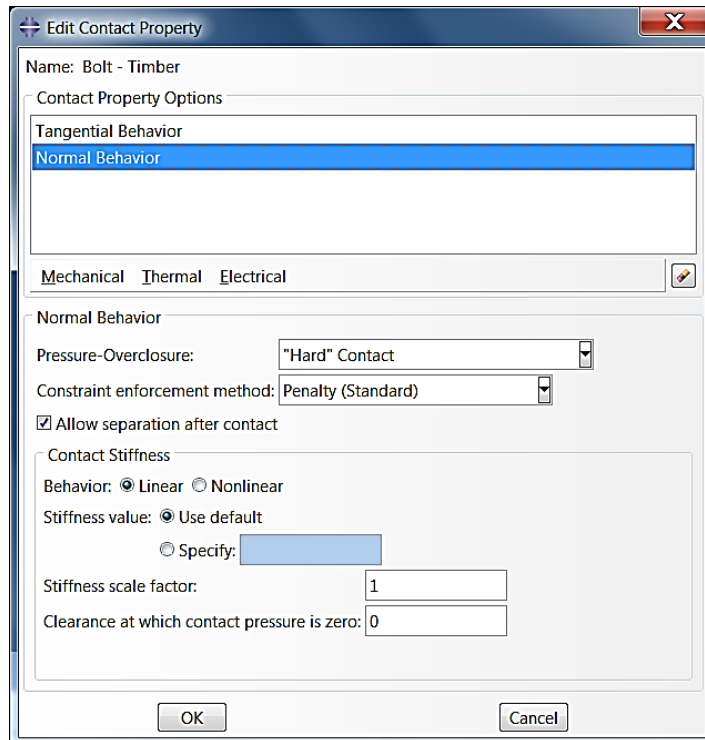
Slave Adjustment: **Surface Smoothing** | Clearance | Bonding

No adjustment
 Adjust only to remove overclosure
 Specify tolerance for adjustment zone: 0
 Adjust slave nodes in set:

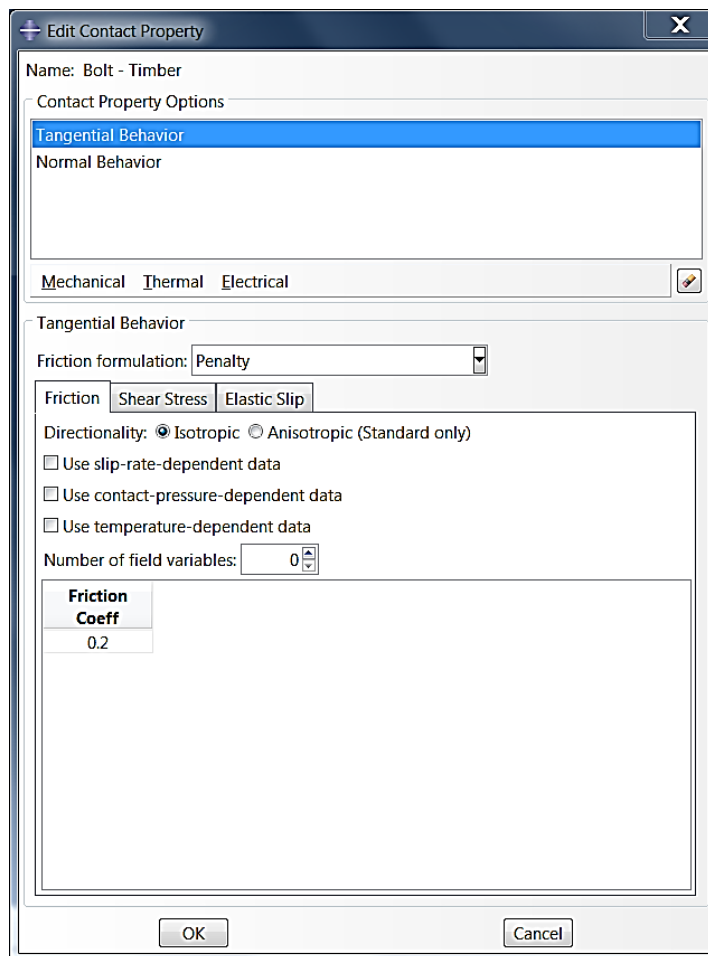
Contact interaction property: Bolt - Timber
 Options: Interference Fit...
 Contact controls: (Default)
 Active in this step

OK Cancel

obr. 56 Parametry kontaktní vazby svorníku a ocelového plechu v programu ABAQUS



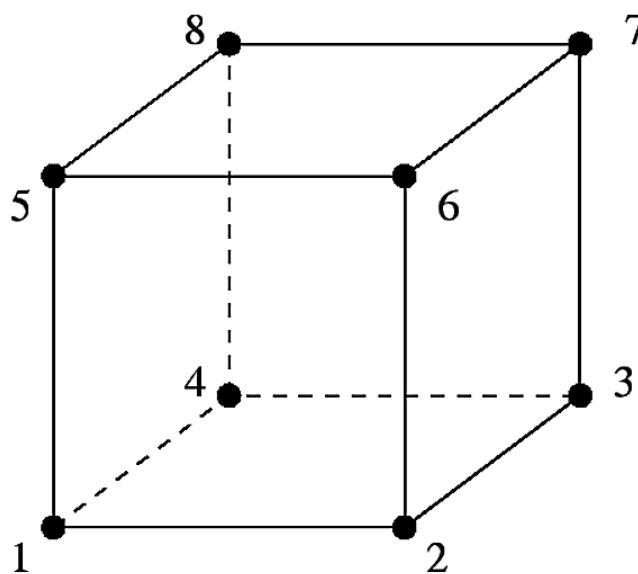
obr. 57 Parametry kontaktní vazby v programu ABAQUS



obr. 58 Parametry tangenciální kontaktní vazby v programu ABAQUS

5.1.5 Výpočetní síť

Důležitým aspektem výpočtu je stanovení hustoty sítě. Pro co nejpřesnější výsledek je vhodné nastavení co nejhustší sítě. Je však nutné zvážit velikost vzdálenosti uzlů vzhledem k časové náročnosti výpočtu. Čím více konečně-prvkových elementů je pro výpočet v programu definováno, tím více se zvyšují nároky na výpočetní techniku a prodlužuje se výpočetní čas. Po provedení citlivostní analýzy sítě, která zahrnovala úpravu parametrů velikosti elementů a uzlů sítě, jejich tvar a uspořádání, byla zvolena hexagonální strukturovaná síť C3D8R, viz obr. 59. Typy elementů sítě byly stanoveny lineární osmiuzlové objemové elementy se sníženou integrací. Každý uzel má tři stupně volnosti, a to posuvy ve směru osy x , y a z . Integrační bod elementu se nachází uprostřed prvku. Jsou proto vyžadovány malé prvky, které zachycují koncentraci napětí na hranici struktury [37].



obr. 59 Typ elementu C3D8R [37]

Zasítování prvků proběhlo automatickým vygenerováním, jímž byla definována globální velikost elementů. Pro svorníky byla velikost elementů stanovena hodnotou 4 mm, pro vložený ocelový plech a pro dřevěné prvky 5 mm. Počet elementů a uzlů výpočetní sítě vzorku číslo 1 je uveden na obr. 60. Protože byl svorník definován v kontaktních vazbách ve styku s dřevěným prvkem a ocelovým plechem vlastnosti Slave plochy, byla nastavena jemnější síť než tomu bylo v případě síťování dřevěného prvku a ocelového plechu, viz obr. 61. Na detailu zasítování v místě kontaktu svorníku a dřevěného prvku na obr. 62 je tento rozdíl velikosti výpočtových elementů značně patrný.

Mesh Statistics

Summary

Total number of nodes: 133421
Total number of elements: 115872

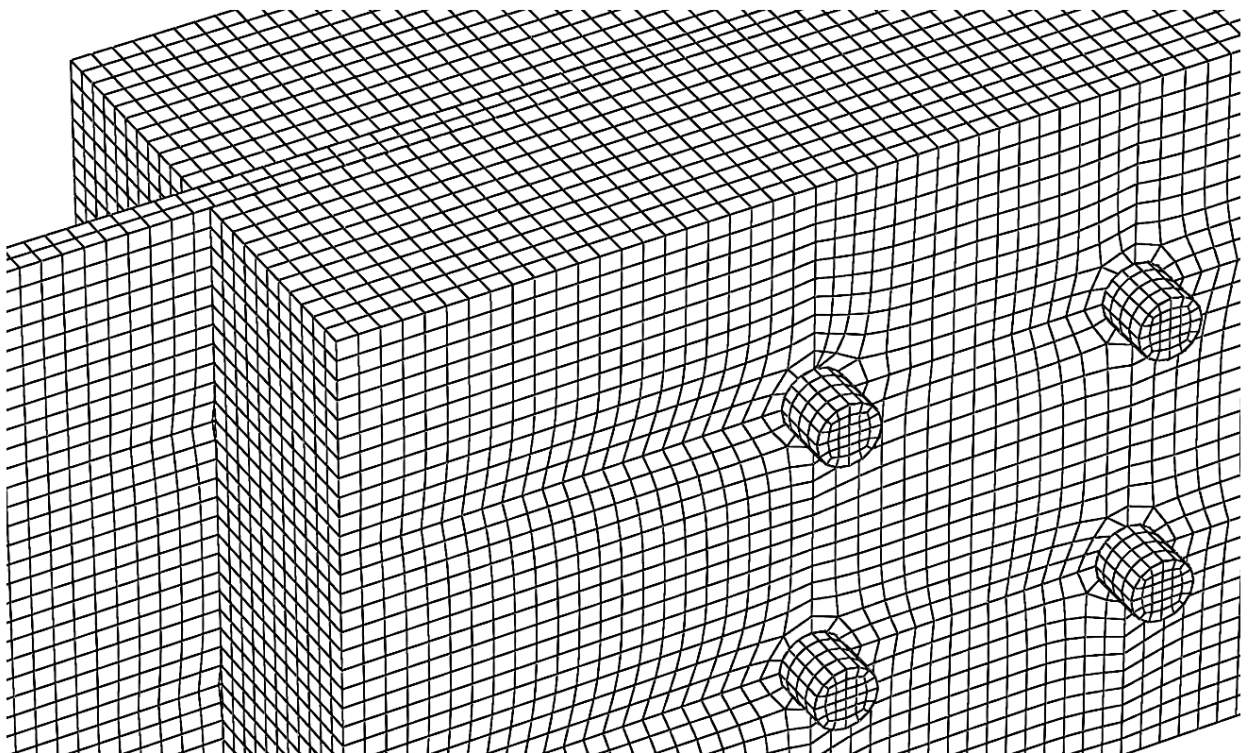
Details

By Instance | By Element Type

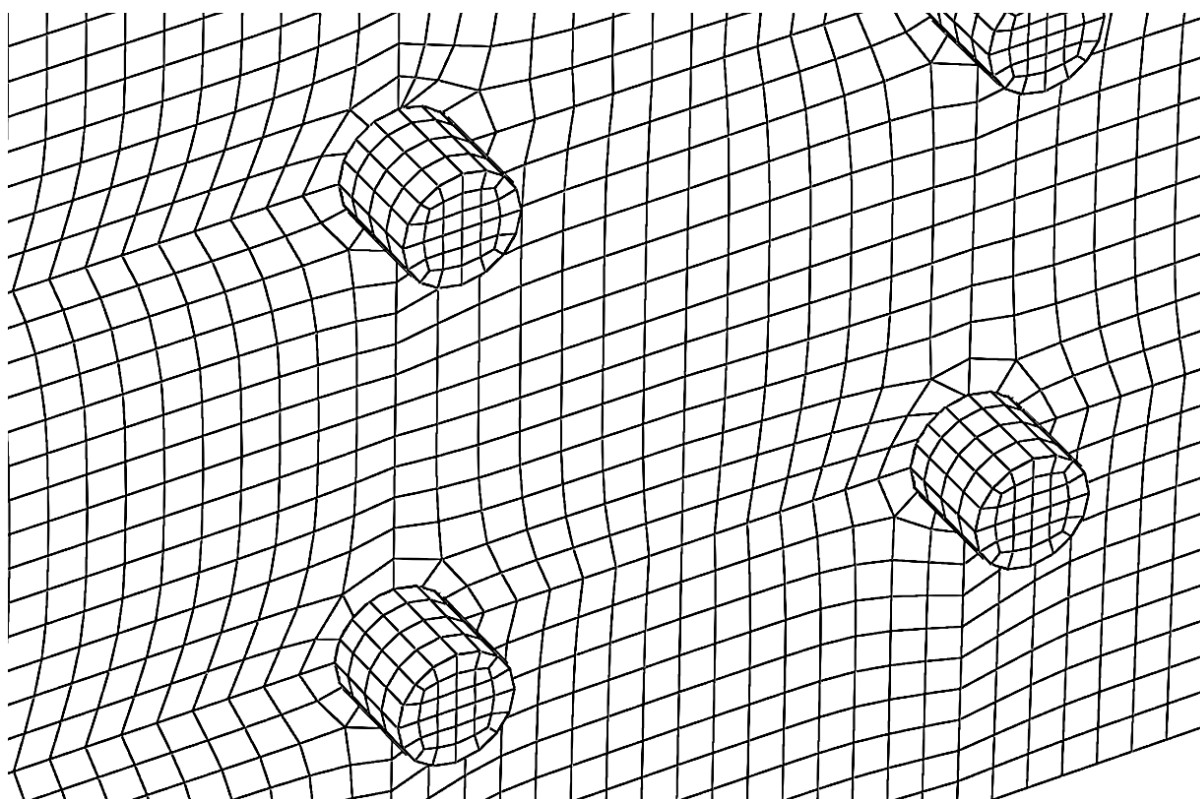
	Instance Name	Element Type	Elements	Nodes
1	Bolt-1		1216	1599
2		C3D8R	1216	
3	Plate-1		6860	10794
4		C3D8R	6860	
5	Bolt-1-lin-1-2		1216	1599
6		C3D8R	1216	
7	Bolt-1-lin-2-1		1216	1599
8		C3D8R	1216	
9	Bolt-1-lin-2-2		1216	1599
10		C3D8R	1216	
11	Bolt-1-lin-3-1		1216	1599
12		C3D8R	1216	
13	Bolt-1-lin-3-2		1216	1599
14		C3D8R	1216	
15	Timber-1		101716	113033
16		C3D8R	101716	

Dismiss

obr. 60 Popis zasíťování vzorku č. 3

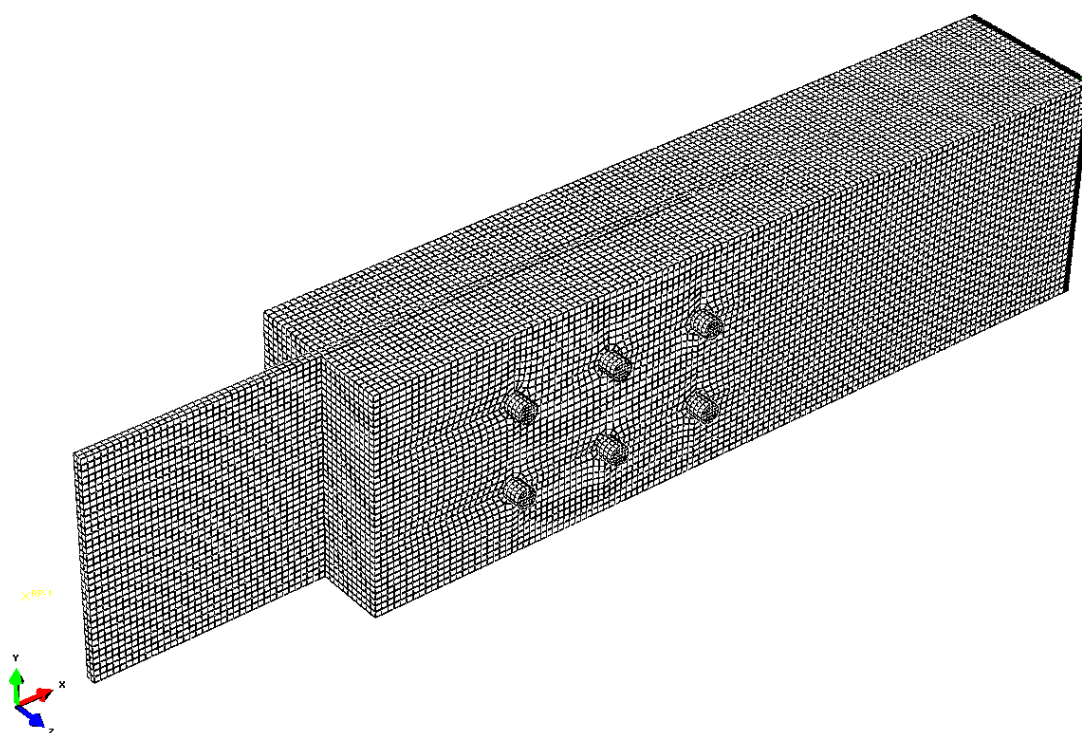


obr. 61 Detail zasíťování - rozdíl parametrů sítě jednotlivých prvků



obr. 62 Detaily zasiťování v místě kontaktu svorníku a dřevěného prvku

Schéma zasiťování celého modelu vzorku č. 1 je vyobrazeno na obr. 63. Je zde patrné, že v místech vložení ocelových svorníků kruhového průřezu dochází k vytvoření nepravidelností jinak pravidelně čtvercových síťových elementů.



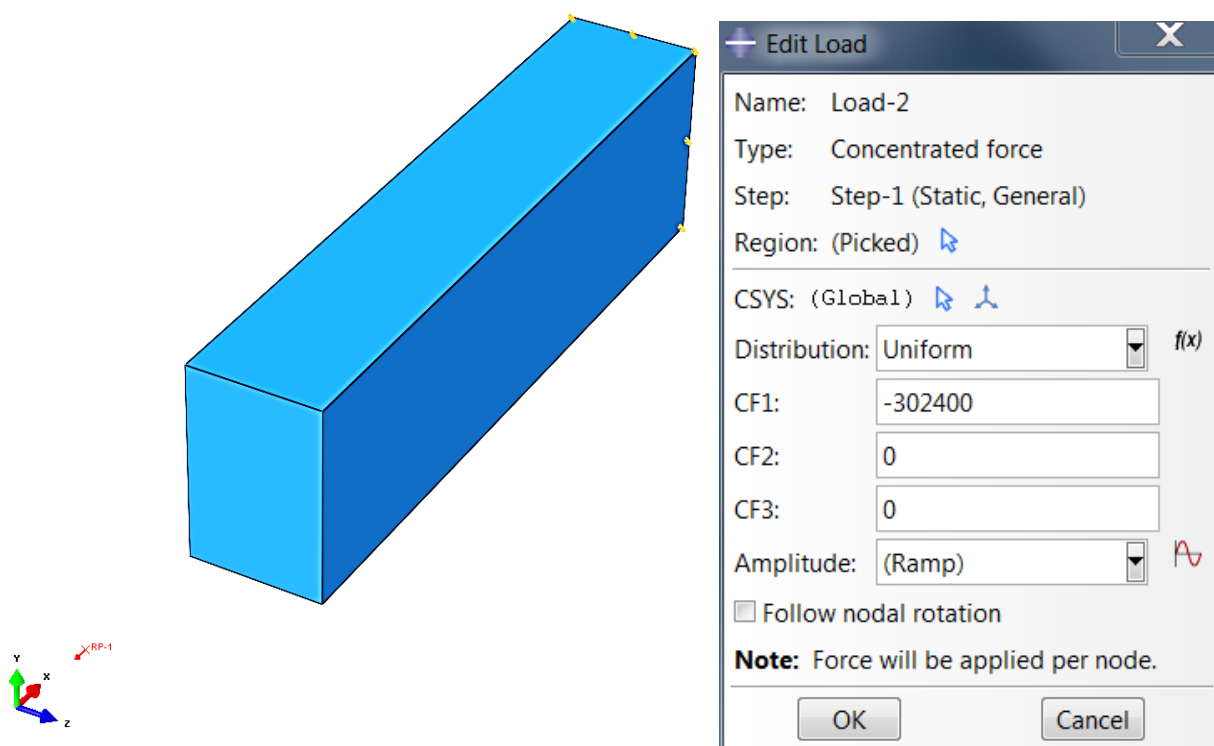
obr. 63 Schéma zasiťování modelu vzorku č. 3

5.2 Zjednodušený numerický model

Na základě sestaveného zjednodušeného analytického modelu v kapitole 4.1 je vytvořen zjednodušený numerický model v programu ABAQUS.

5.2.1 Popis zjednodušeného modelu

Geometrie, materiálové vlastnosti a podepření modelu byly definovány stejným způsobem, který je popsán v předchozí kapitole. Hodnota působící síly byla zadávána do referenčního bodu tak, jako v případě vytvořeného modelu celého spoje, viz obr. 64. Zkoušena byla i varianta zadávání síly přímo na čelní průřezovou plochu dřevěného prvku. Zatěžovací síla byla v tomto případě přepočítána ve vztahu k obsahu průřezové plochy dřevěného trámku. Výsledky posunů získané těmito způsoby se shodovali. Porovnáním se ověřila funkce Coupling virtuálně propojující modelované těleso s referenčním bodem.



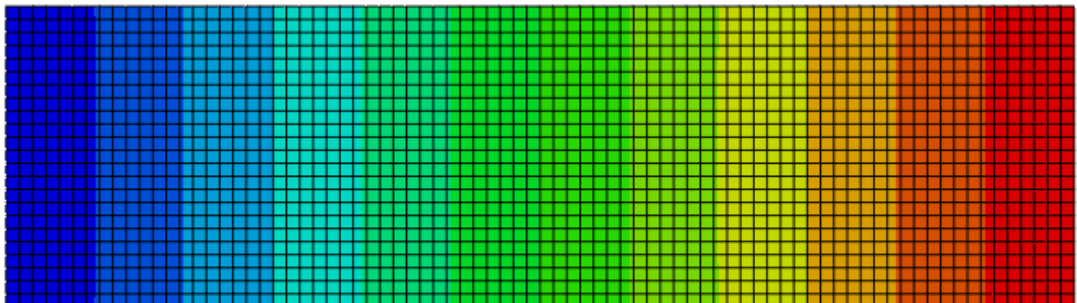
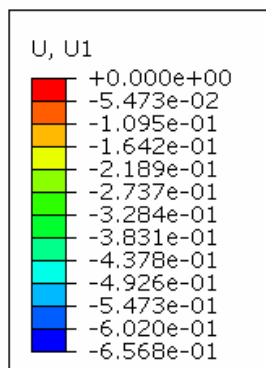
obr. 64 Schéma zjednodušeného modelu trámku s uvedenými parametry zadávané síly v programu ABAQUS

5.2.2 Verifikace zjednodušeného modelu

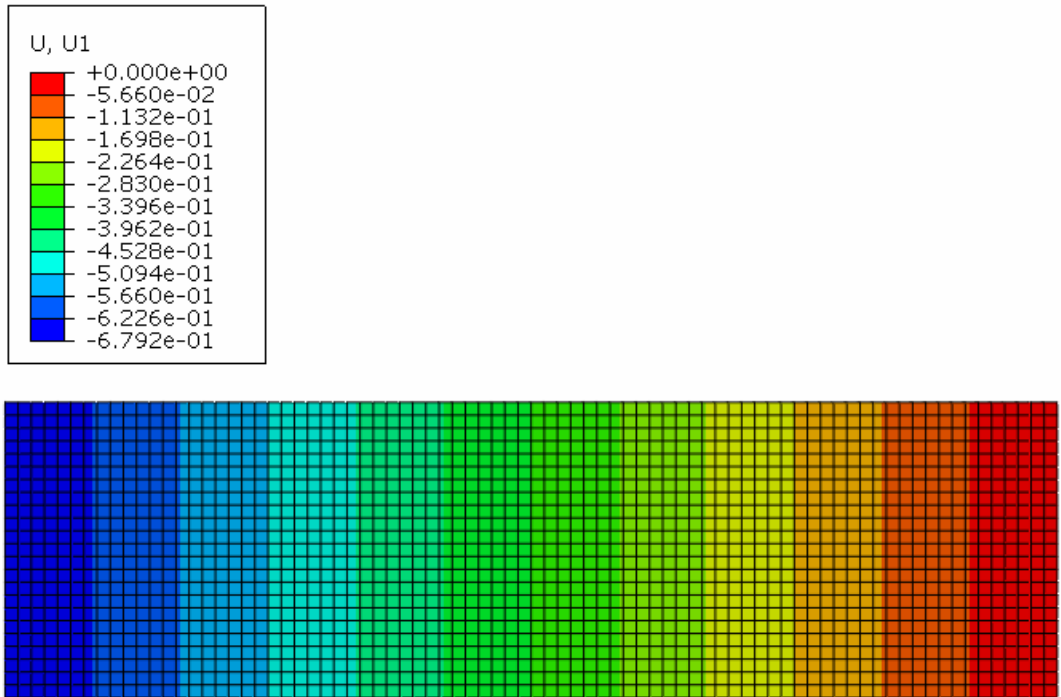
Z porovnání hodnot deformací stanovených z numerického a analytického modelu v tab. 11 vyplývá, že hodnoty elastických vlastností dřeva jsou v numerickém modelu správně definovány. Hodnoty deformací se liší u dvou spojů o tisícinu milimetru, tato odchylka je dána pravděpodobně zaokrouhlováním hodnot během analytického výpočtu. Deformace jednotlivých zjednodušených modelů z numerického modelování jsou vykresleny na obr. 65 až obr. 73.

tab. 11 Porovnání zjednodušeného analytického a numerického modelu

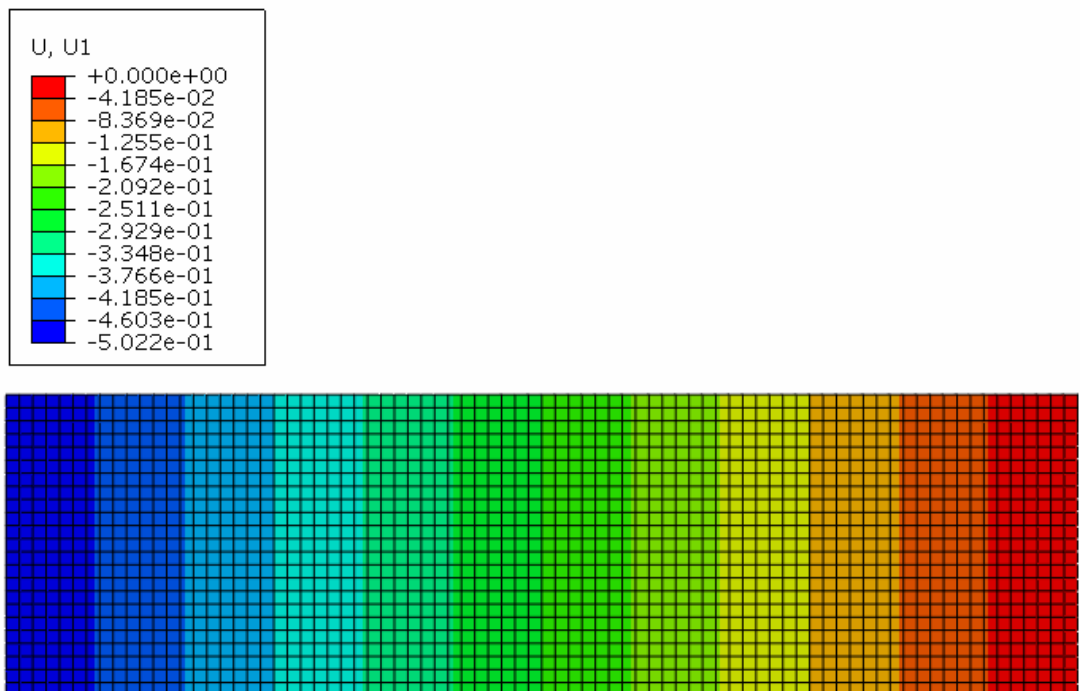
Model	E_L [MPa]	$f_{t,0,k}$ [MPa]	l_0 [mm]	Deformace z analytického modelu Δl [mm]	Deformace z numerického modelu Δl [mm]
Z1	13650	14	640	0,657	0,657
Z2	13200	14	640	0,679	0,679
Z3	17850	14	640	0,502	0,502
Z4	11000	14	640	0,814	0,814
Z5	10800	14	640	0,829	0,829
Z6	16600	14	640	0,540	0,540
Z7	10500	14	640	0,853	0,852
Z8	12000	14	640	0,747	0,747
Z9	10991	14	640	0,815	0,814



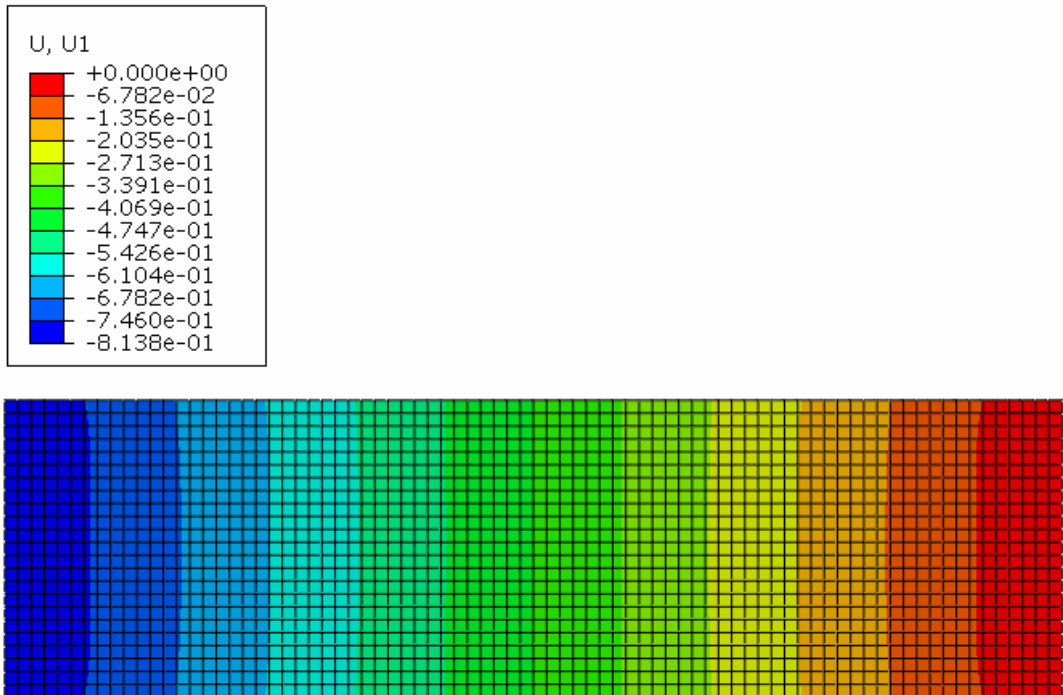
obr. 65 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z1



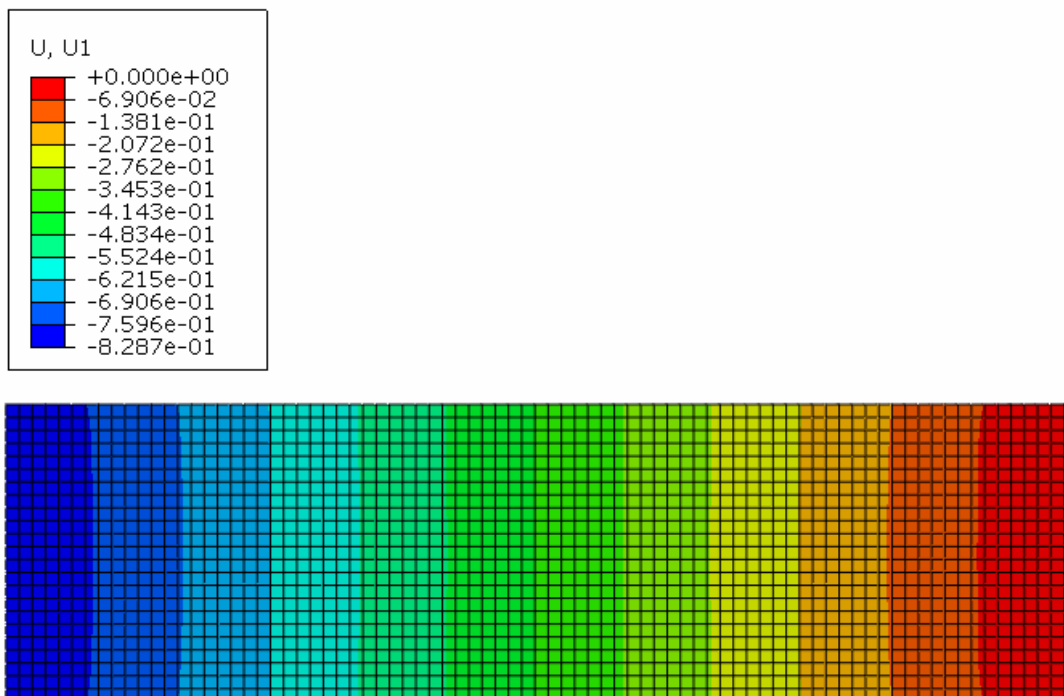
obr. 66 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z2



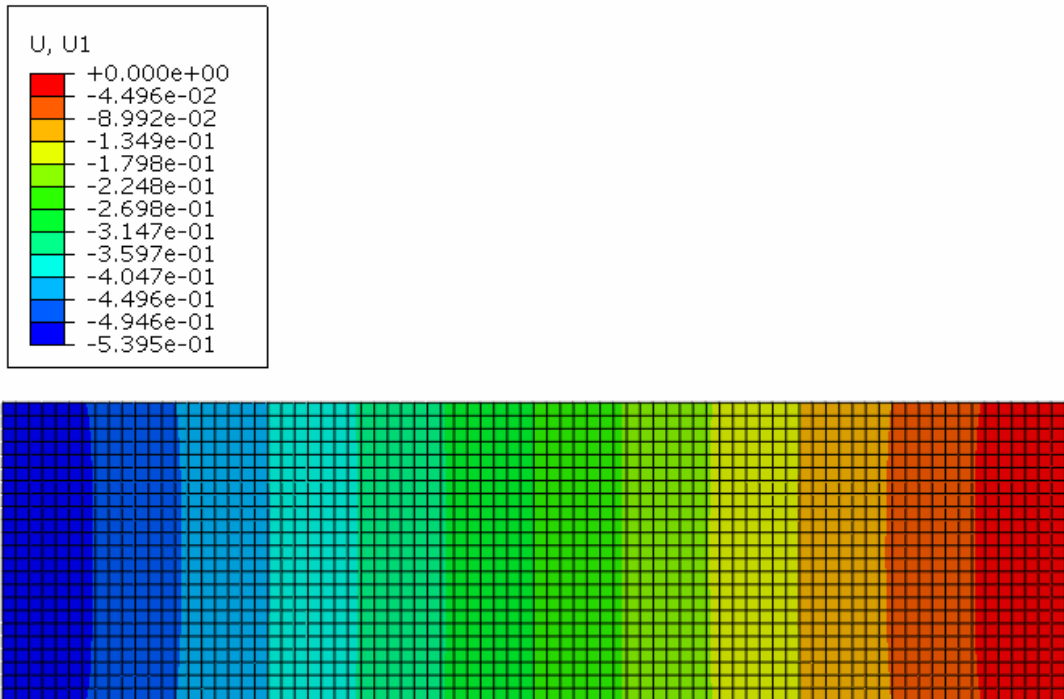
obr. 67 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z3



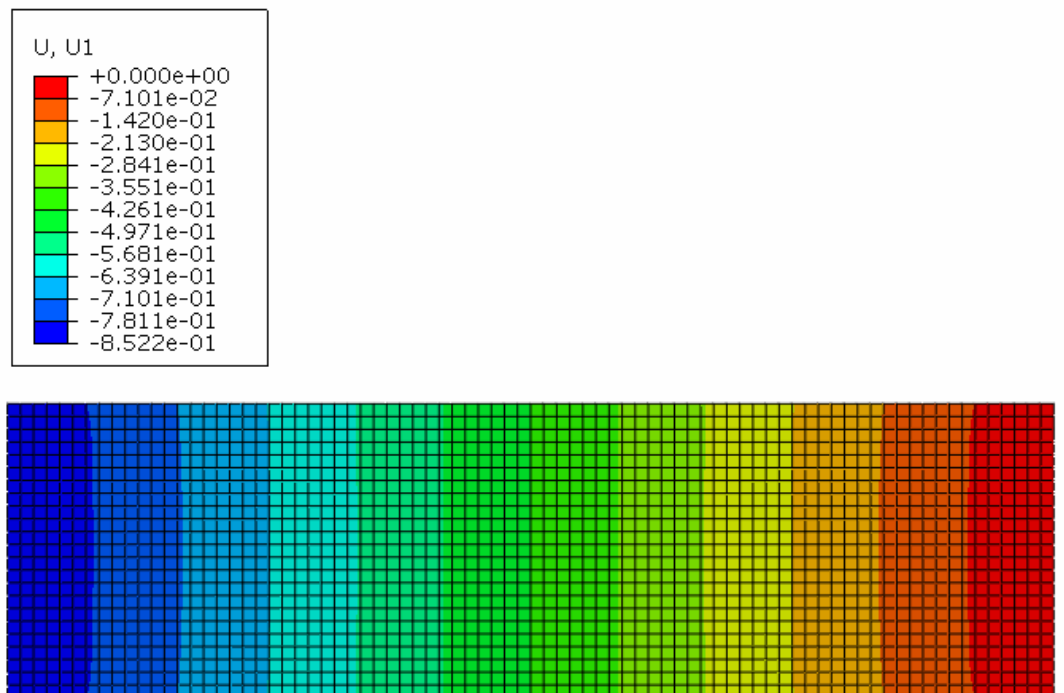
obr. 68 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z4



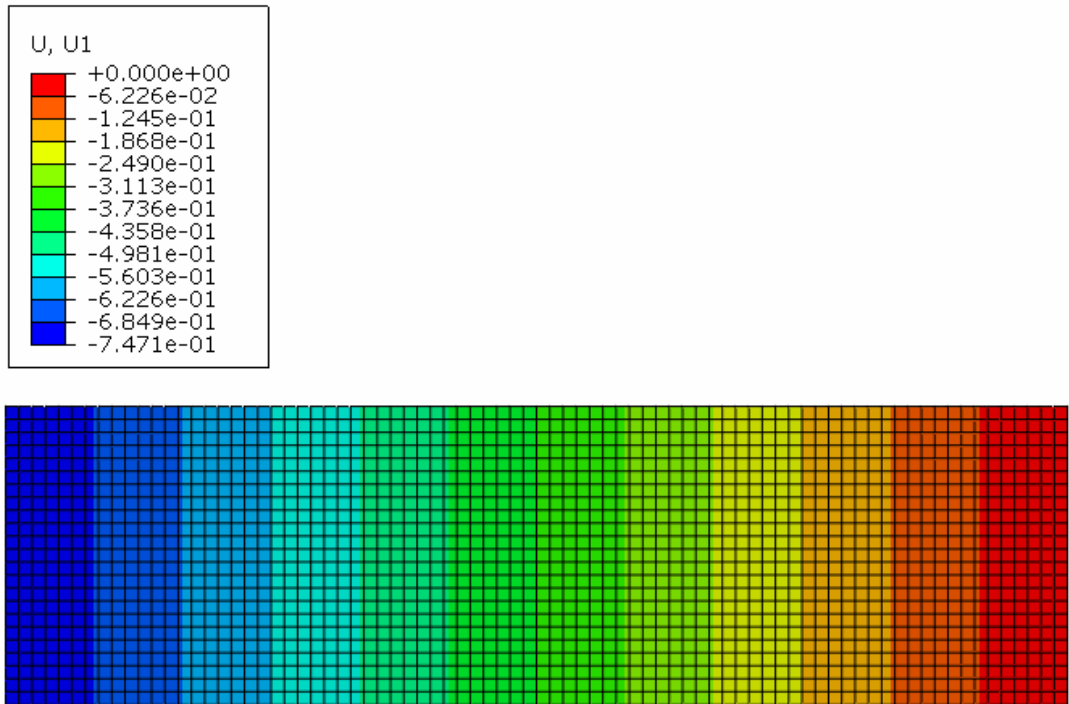
obr. 69 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z5



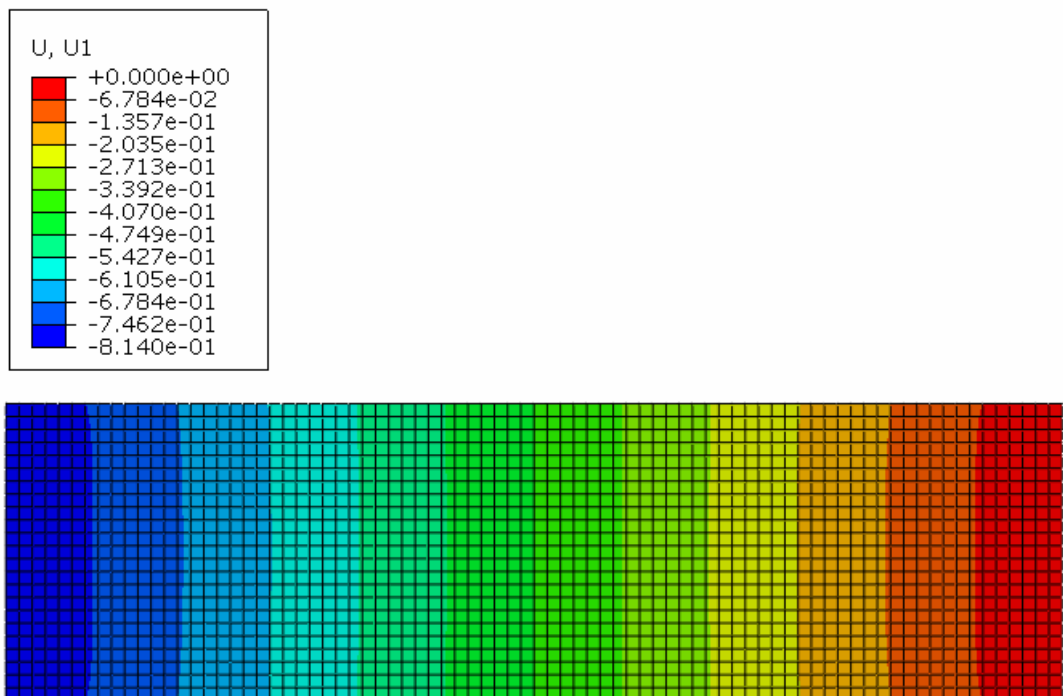
obr. 70 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z6



obr. 71 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z7



obr. 72 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z8



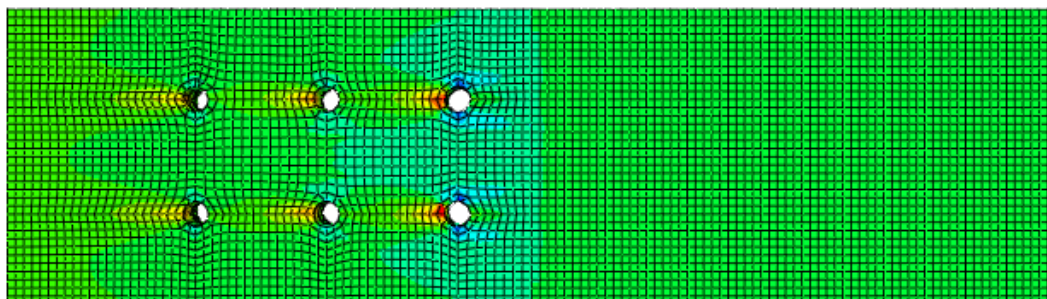
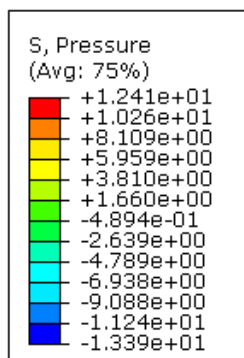
obr. 73 Hodnoty posunu [mm] zjednodušeného modelu Z9

6 Verifikace numerického modelu

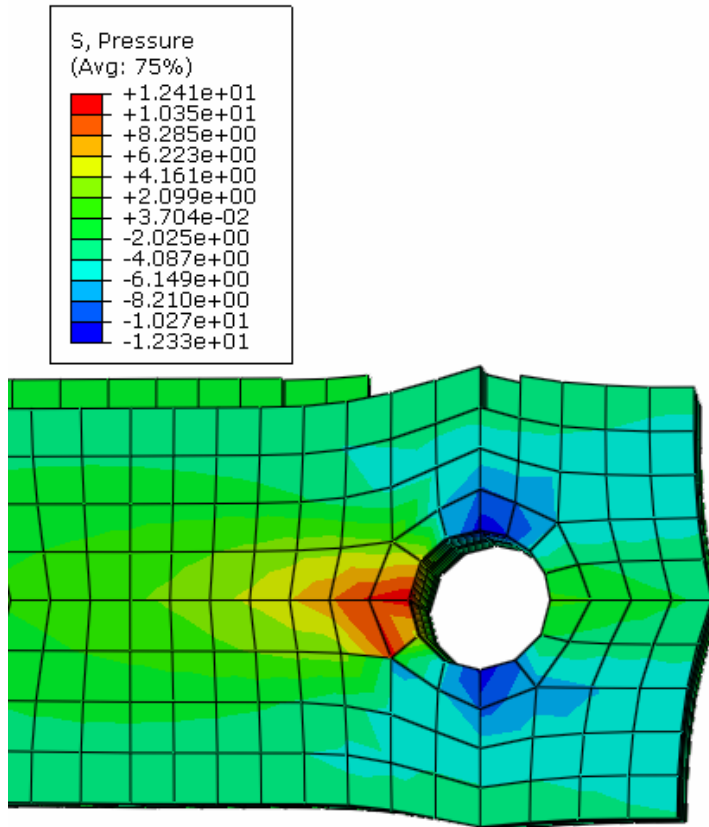
Analytickým výpočtem byla stanovena únosnost spoje, která dosahuje hodnoty 138 kN.

Ze závislosti maximálního tahového namáhání dřevěného prvku na hodnotě působící síly vyplývá, že k porušení spoje dochází překročením tahového namáhání prvku 14 MPa. K překročení dovoleného napětí dochází při působení síly 145,2 kN. Z výsledků vyplývá, že numerický model věrohodně simuluje výsledky stanovené podle ČSN EN 1995-1-1:2007 [14]. Hodnoty únosností experimentů bude lépe předpovídat numerický model s uvažováním plastických deformací dřevěného prvku. Předpokládají se vyšší hodnoty únosností stanovených experimentálně než stanovených analytickým výpočtem.

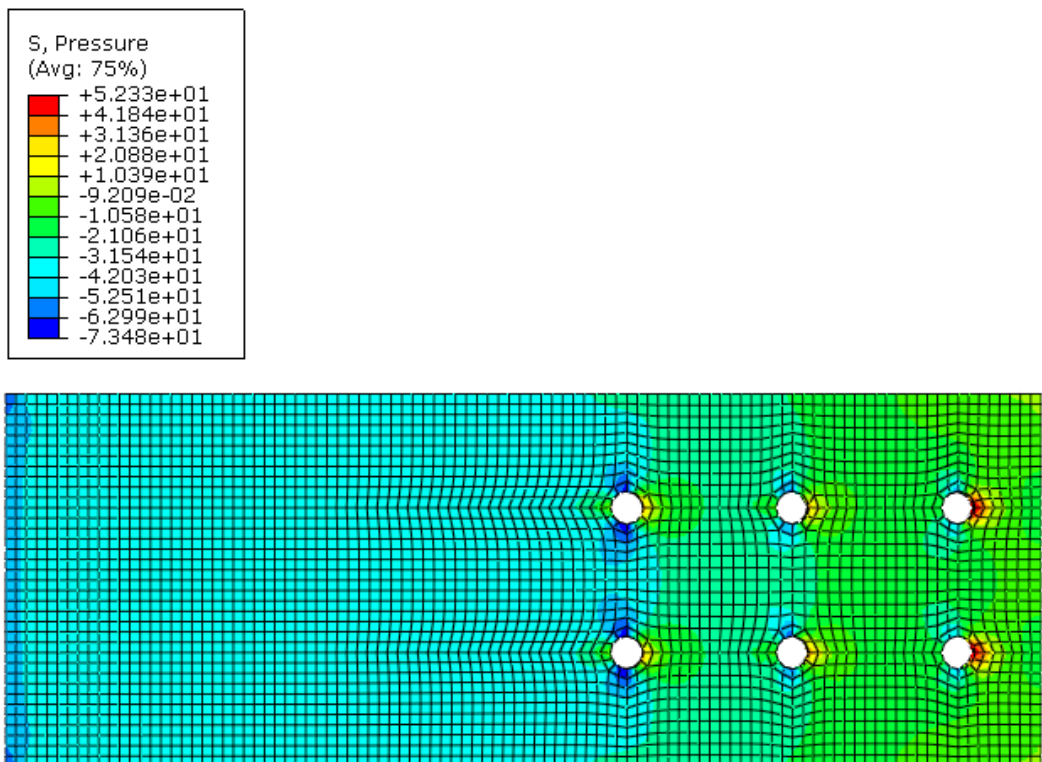
V následující části jsou na obr. 74 až obr. 84 vykresleny napětí a posuny ve směru působící síly jednotlivých prvků spoje. Výsledky jsou vykresleny při působení předpokládané maximální síly ve spoji 138 kN. Napětí jsou uvedena v jednotkách MPa. Vykreslena jsou tlaková napětí. Mínus značí tahová namáhání.



obr. 74 Hodnoty napětí [MPa] v dřevěném prvku spoje při působení tahové síly 138 kN

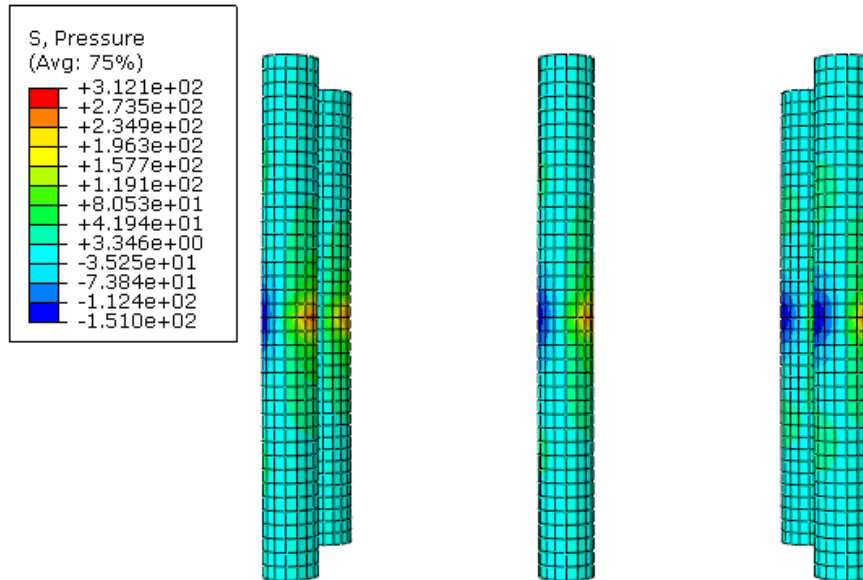


obr. 75 Hodnoty napětí [MPa] v místě otvoru dřevěného prvku spoje při působení tahové síly 138 kN

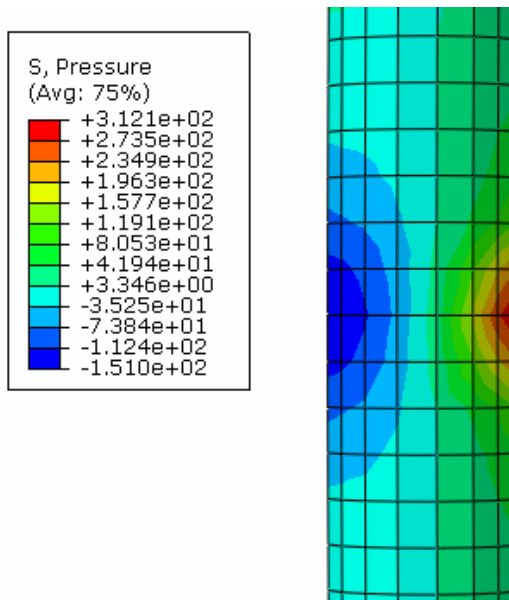


obr. 76 Hodnoty napětí [MPa] v ocelovém plechu spoje při působení tahové síly 138 kN

Nejvíce zatíženými svorníky jsou ty, které se nachází nejdále od působiště tahové síly, což je patrné i z obr. 77. Z detailu na obr. 78 jsou patrné deformace svorníku a vzniklá tahová a tlaková napětí z ohybu spojovacího prostředku.

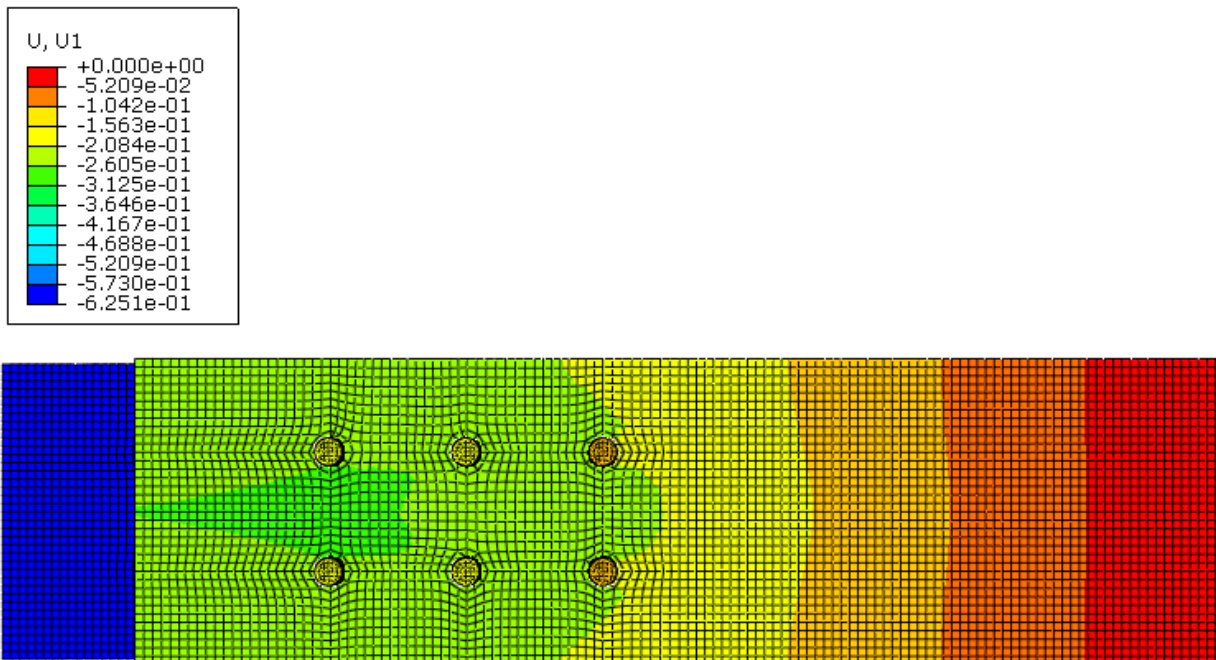


obr. 77 Hodnoty napětí [MPa] ve svornících spoje při působení tahové síly 138 kN

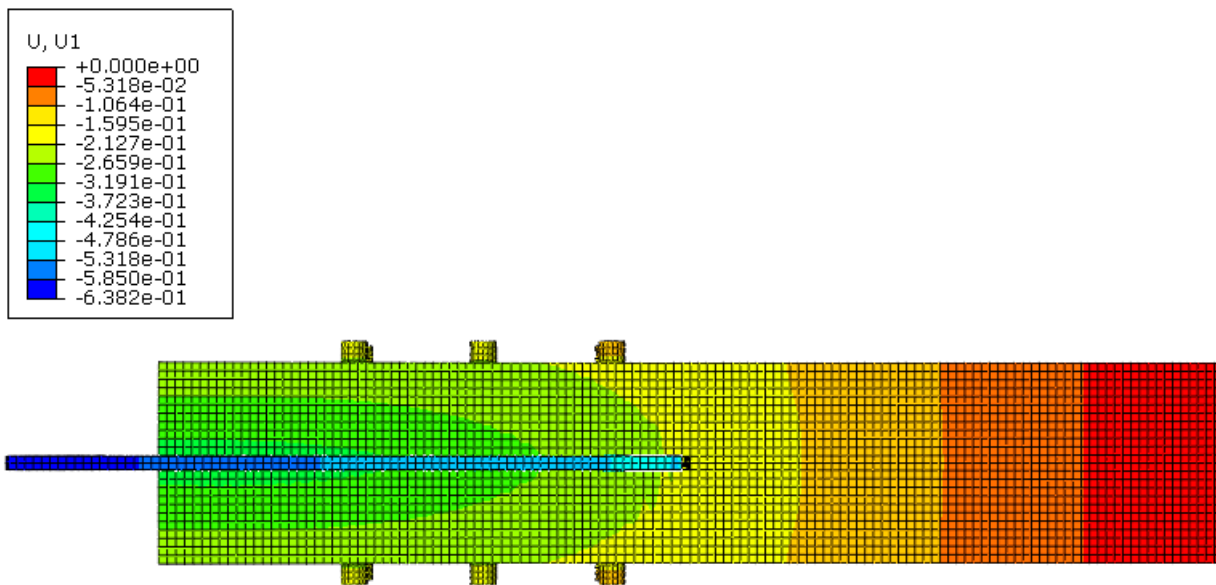


obr. 78 Hodnoty napětí [MPa] v detailu nejvíce namáhaného svorníku při působení tahové síly 138 kN

Vykreslené posuny označené U, U1 značí posuny ve směru osy x, která je rovnoběžná se směrem působící tahové síly. Hodnoty posunů jsou uvedeny v mm. Vzhledem k působení tahové síly v opačném než směru osy x dosahují posuny záporných hodnot.

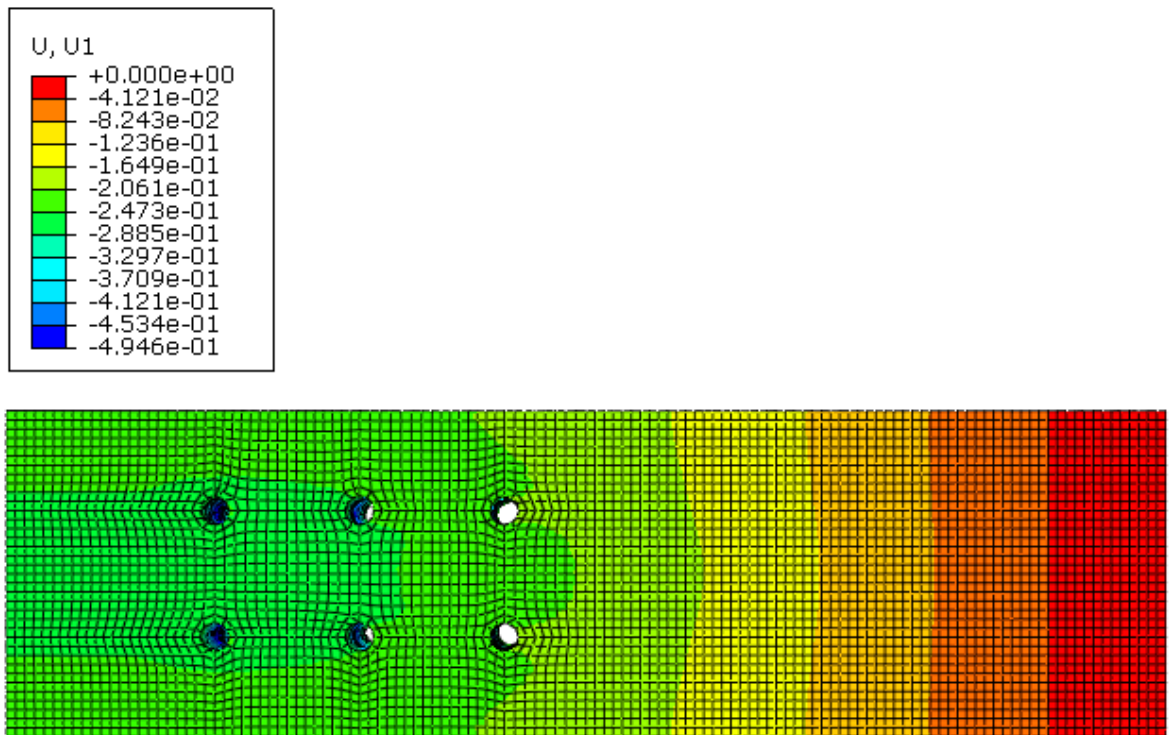


obr. 79 Hodnoty posunu [mm] celého spoje při působení tahové síly 138 kN - čelní pohled

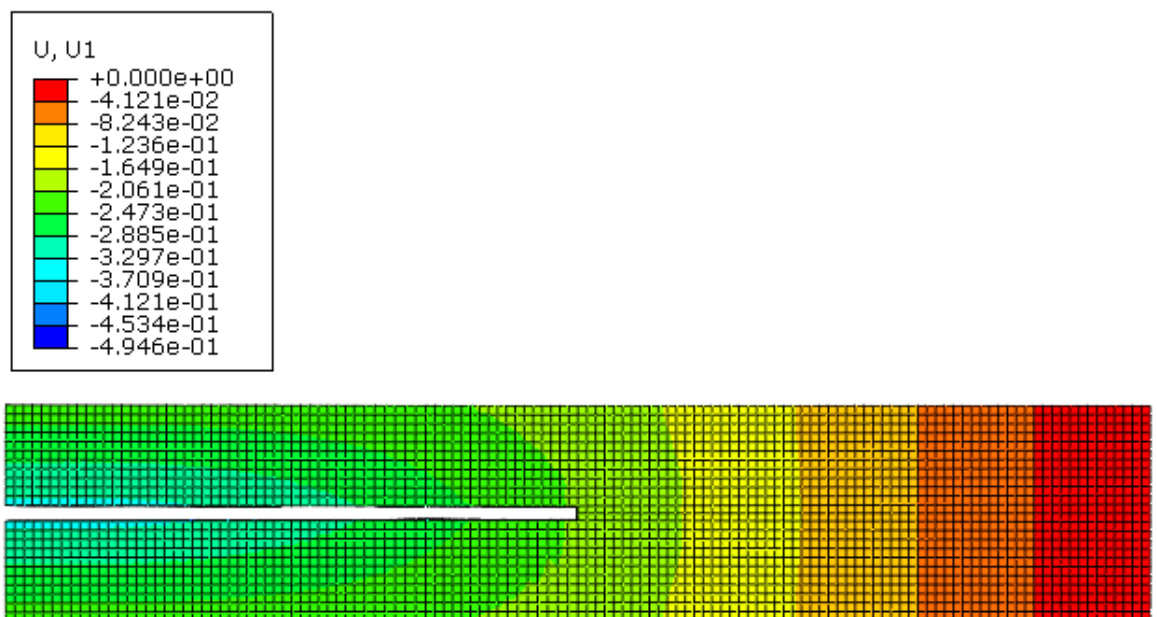


obr. 80 Hodnoty posunu [mm] celého spoje při působení tahové síly 138 kN - pohled shora

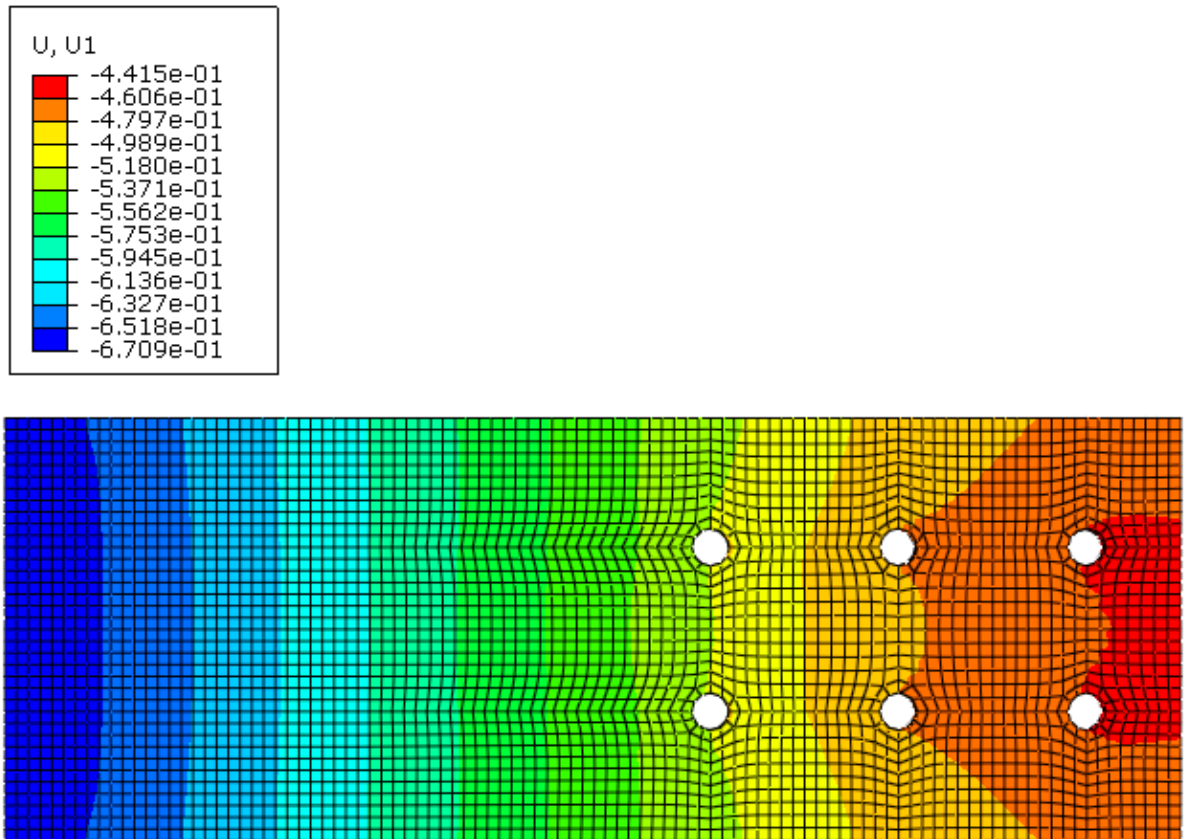
Výrazné deformace dřevěného prvku jsou patrné z obr. 81 a obr. 82. Dochází k posunu dřevěného prvku v době porušení až na hodnotu 0,494 mm. K této maximální deformaci dochází ve výpočetním elementu v místě zářezu pro vložení ocelového plechu nejbližší působišti tahové síly.



obr. 81 Hodnoty posunu [mm] dřevěného prvku při působení tahové síly 138 kN - čelní pohled

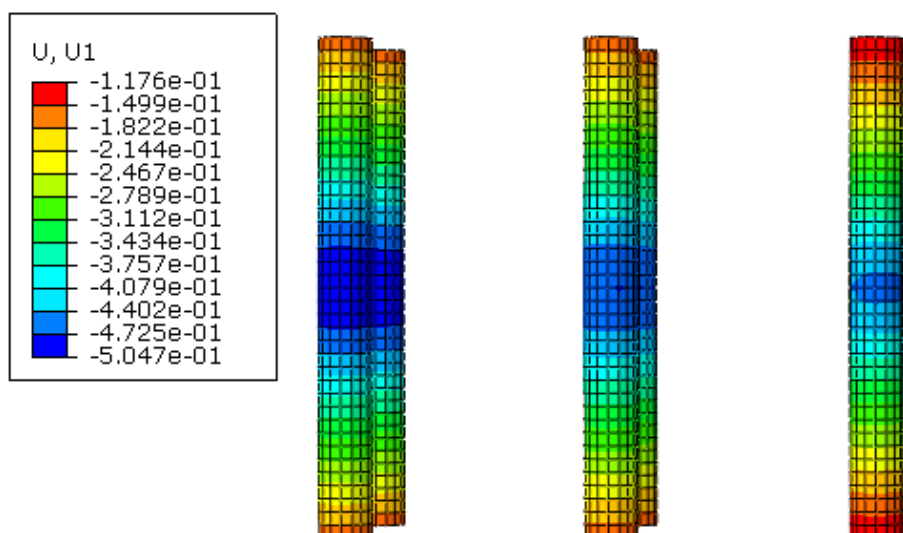


obr. 82 Hodnoty posunu [mm] dřevěného prvku při působení tahové síly 138 kN - pohled shora



obr. 83 Hodnoty posunu [mm] ocelového plechu při působení tahové síly 138 kN

Svorníky jsou značně zdeformovány a dochází k jejich celkovému posunu v závislosti na protažení dřevěného a ocelového prvku.



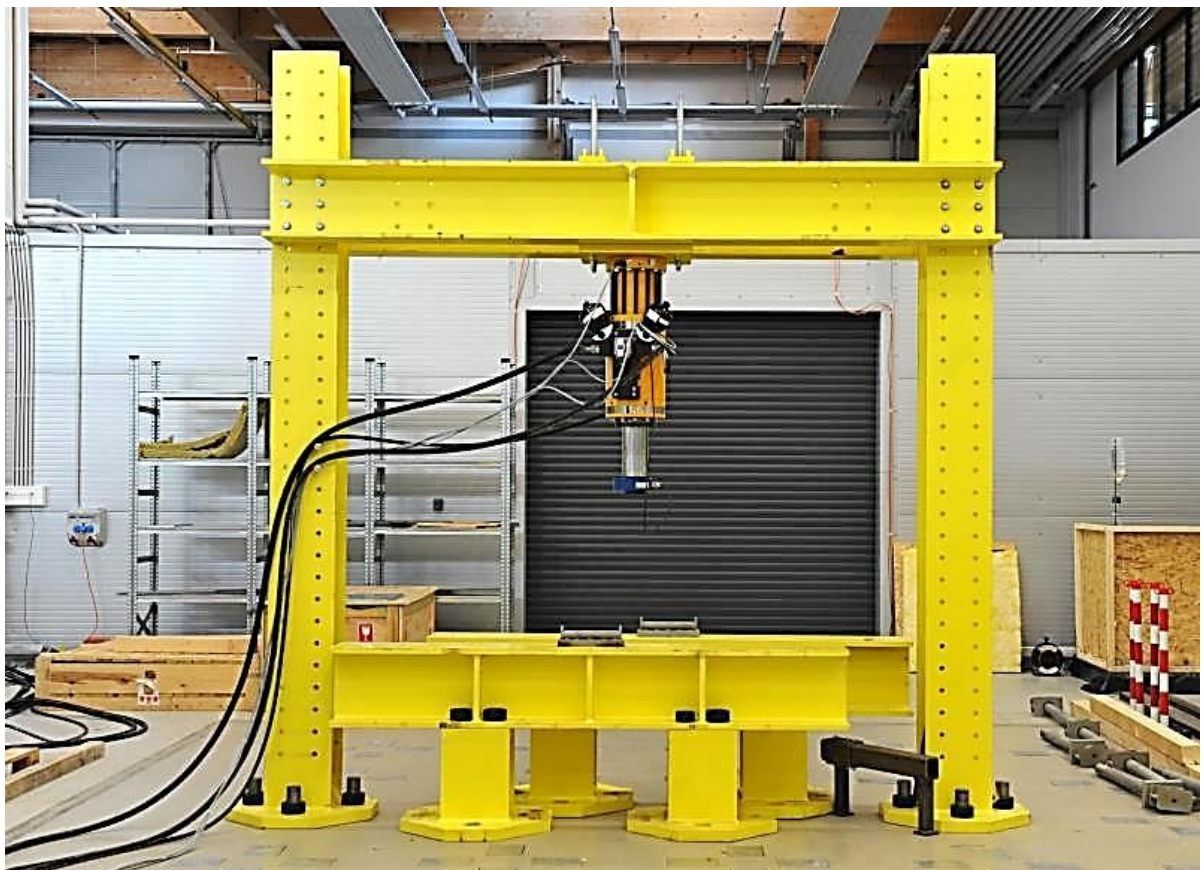
obr. 84 Hodnoty posunu [mm] skupiny svorníků při působení tahové síly 138 kN

7 Příprava experimentů

V rámci experimentální části této práce proběhla v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB) v Buštěhradě zkouška vybraných spojů s vkládanými styčnickovými plechy spojených svorníkovými spojovacími prostředky. Měření byla zaměřena na chování dřevěného spoje při namáhání tahovou silou rovnoběžně s vlákny. Zkušební haly jsou součástí Akreditované laboratoře OL181, která spadá pod zkušební laboratoř Fakulty stavební ČVUT [38].

7.1 Zkušební zařízení

Hydraulické čelisti zařízení pro tahové zkoušky umožňují zkoušky s maximální silou v tahu pro běžné konstrukční prvky 300 kN. Při návrhu rozměrů zkušebního prvku je nutné zohlednit rozměrové možnosti laboratorního zařízení: maximální výška prvku 3 m a délka 15 m a variabilní nastavení zatěžovacích rámu, viz obr. 85. Řízení zkoušky je určováno působící silou nebo předepsanou deformací. Měření deformací a relativních přetvoření se provádí v průběhu zkoušky. Hydraulické zatěžovací zařízení je na obr. 86.



obr. 85 Zkušební zařízení pro silové zatěžování vzorků [39]



obr. 86 Hydraulický zatěžovací válec [39]

7.2 Popis vzorků

Zkušební vzorky jsou navrženy pro nejvěrnější přiblížení reálně navrhovaných konstrukcí a podle možností zkušebního zařízení v osmi variantách. Varianty se liší v průměru spojovacího prostředku, velikosti ocelových podložek, třídě pevnosti dřeva, počtu řad spojovacích prostředků a jejich roztečích, viz tab. 12. Dřevěné prvky jsou zhotoveny z rostlého dřeva pevnostní třídy C24 obdélníkového průřezu. Pro porovnání jsou zkoušeny také vzorky z lepeného lamelového dřeva GL24h, které má oproti rostlému dřevu zpravidla menší odchylky od požadované vlhkosti a menší tvarové a geometrické nedokonalosti prvků. Omezením přirozených vad v případě lepeného dřeva se předpokládá menší ovlivnění výsledku experimentálního měření. V dřevěných prvcích budou předem vyřezány spáry pro vložení ocelového plechu. Šířku spáry je nutné vyřezat vždy o 1 mm větší než je tloušťka vkládaných plechů, které budou zhotoveny tloušťky 6 mm označené P6. Hloubka výřezu bude o 5 mm větší než vložená délka ocelového plechu, která se liší v závislosti na průměru spojovacích prostředků a jejich roztečích. S ohledem na běžně používané spoje byla navržena ocel třídy pevnosti S235JR.

Svorníky jsou navrženy ve dvou variantách tedy průměru 16 mm a 20 mm běžné, metrické, celozávitové šrouby s 6-ti hranou hlavou pevnostní třídy 8.8 značené M16 a M20. Schéma vzorku s použitím svorníků průměru 16 mm je patrné z obr. 87 a s použitím svorníků průměru 20 mm z obr. 88. Délka svorníků svírající dřevěné prvky činí 200mm. Svorníky M16 slouží pro připojení prvků o celkové tloušťce 130 mm, což odpovídá tloušťce dřevěného prvku 120 mm a ocelových podložek 2 x 5 mm. Pro svorníky M20 byly navrženy podložky tloušťky 6 mm, tloušťka svíraného spoje tedy činí 132 mm. Rozměry ocelových podložek třídy pevnosti oceli S235JR byly navrženy dle normových požadavků. Vnější průměr podložky činí vždy 3 násobek průměru svorníku a tloušťka podložky činí jeho 0,3 násobek. Rozteče a vzdálenosti svorníků od okrajů a konců dřevěného prvku byly stanoveny a posouzeny dle ČSN 1995-1-1:2007 [14]. Šest vzorků je tvořeno spoji se třemi řadami spojovacích prostředků. Byly navrženy také vzorky pouze se dvěma svorníky M20 v řadě, ve kterých hodnoty roztečí činí 200 mm, obr. 89, a 300 mm, obr. 90. Pro ověření správnosti experimentálních měření byly navrženy pro různé průměry svorníků vždy dva stejné vzorky z rostlého dřeva. Vzorky musí být vyrobeny s dostatečnou přesností.

tab. 12 Přehled experimentálních vzorků

Vzorek	Třída pevnosti dřeva	Svorník	Počet svorníků [ks]	Tloušťka plechu [mm]	Rozteče a_1 [mm]
1	C24	M16	6	6	80
2	C24	M16	6	6	80
3	GL24h	M16	6	6	80
4	C24	M20	6	6	100
5	C24	M20	6	6	100
6	GL24h	M20	6	6	100
7	C24	M20	4	6	200
8	C24	M20	4	6	300

Rozteče svorníků průměru 16 mm a jejich normové požadavky dle ČSN EN 1995-1-1:2007 činí:

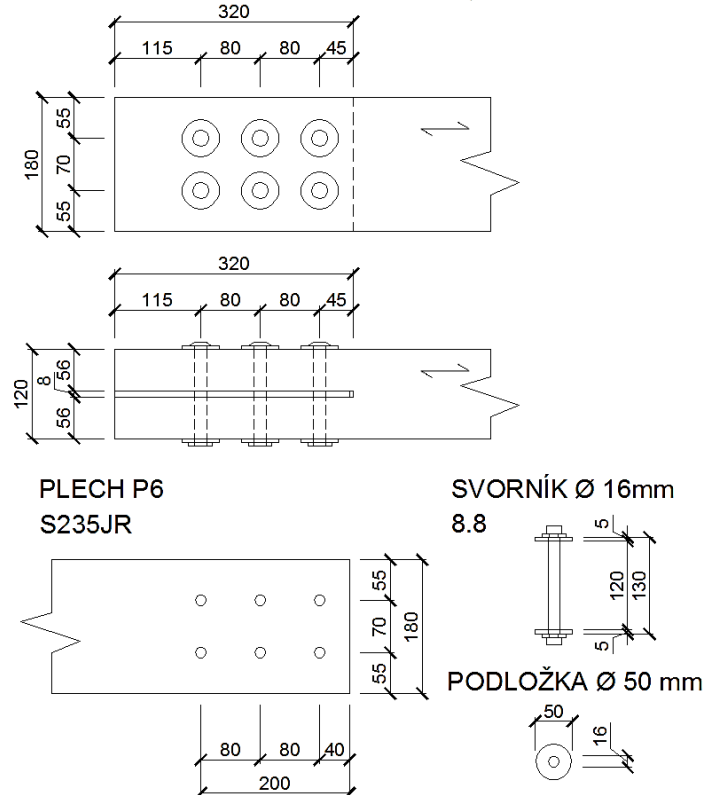
$$a_1 = 80 \text{ mm} \geq (4 + \cos\alpha) \cdot d = (4 + \cos 0^\circ) \cdot 16 = 80 \text{ mm} \quad (33)$$

$$a_2 = 70 \text{ mm} \geq 4 \cdot d = 4 \cdot 16 = 64 \text{ mm} \quad (34)$$

$$a_{3,t} = 115 \text{ mm} \geq \max \{7 \cdot d; 80 \text{ mm}\} = \max \{7 \cdot 16; 80 \text{ mm}\} = 112 \text{ mm} \quad (35)$$

$$a_4 = 55 \text{ mm} \geq \max \{(2 + 2 \cdot \sin\alpha) \cdot d; 3 \cdot d\} = \max \{(2 + 2 \cdot \sin 0^\circ) \cdot 16; 3 \cdot 16\} = 48 \text{ mm} \quad (36)$$

SCHÉMA SPOJE - SVORNÍK Ø 16 mm; $a_1 = 80 \text{ mm}$



obr. 87 Schéma vzorků 1,2,3

Rozteče svorníků průměru 20 mm byly navrženy dle ČSN EN 1995-1-1:2007:

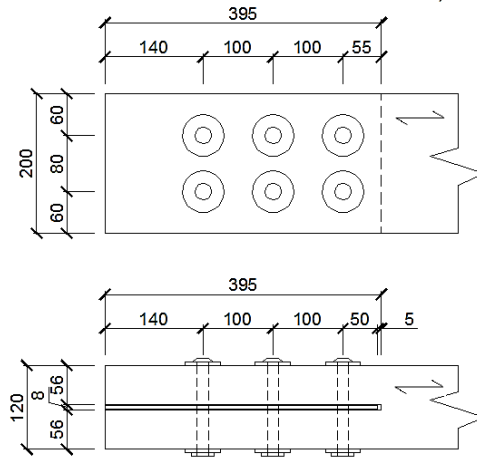
$$a_1 = 100 \text{ mm} \geq (4 + \cos\alpha) \cdot d = (4 + \cos 0^\circ) \cdot 20 = 100 \text{ mm} \quad (37)$$

$$a_2 = 80 \text{ mm} \geq 4 \cdot d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm} \quad (38)$$

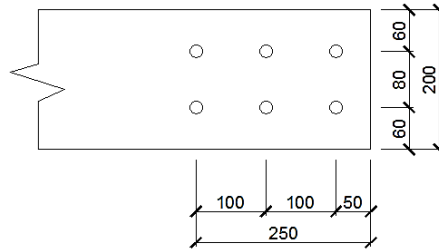
$$a_{3,t} = 140 \text{ mm} \geq \max \{7 \cdot d; 80 \text{ mm}\} = \max \{7 \cdot 20; 80 \text{ mm}\} = 140 \text{ mm} \quad (39)$$

$$a_4 = 60 \text{ mm} \geq \max \{(2 + 2 \cdot \sin\alpha) \cdot d; 3 \cdot d\} = \max \{(2 + 2 \cdot \sin 0^\circ) \cdot 20; 3 \cdot 20\} = 60 \text{ mm} \quad (40)$$

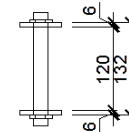
SCHÉMA SPOJE - SVORNÍK Ø 20 mm; $a_1 = 100$ mm



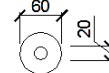
PLECH P6
S235JR



SVORNÍK Ø 20mm
8.8

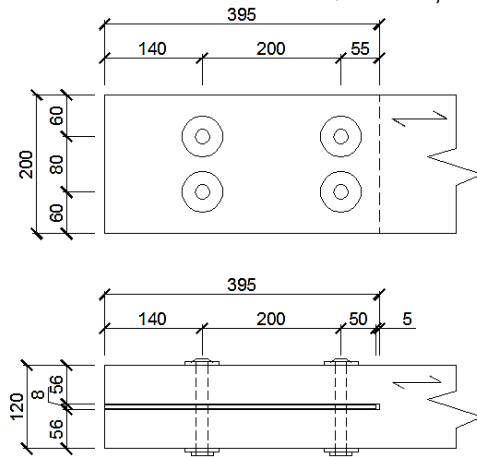


PODLOŽKA Ø 60 mm

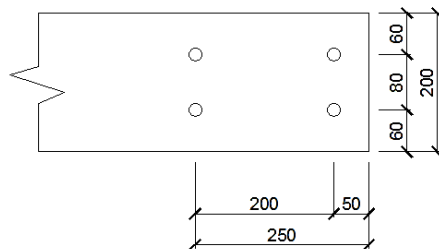


obr. 88 Schéma vzorků 4,5,6

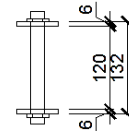
SCHÉMA SPOJE - SVORNÍK Ø 20 mm; $a_1 = 200$ mm



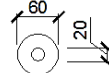
PLECH P6
S235JR



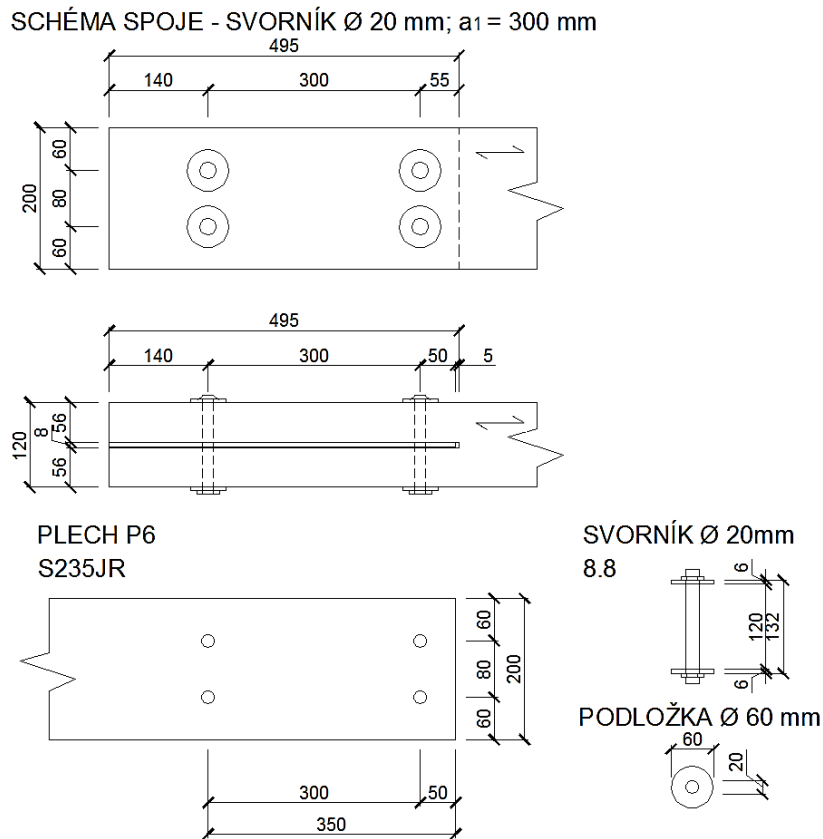
SVORNÍK Ø 20mm
8.8



PODLOŽKA Ø 60 mm



obr. 89 Schéma vzorku 7

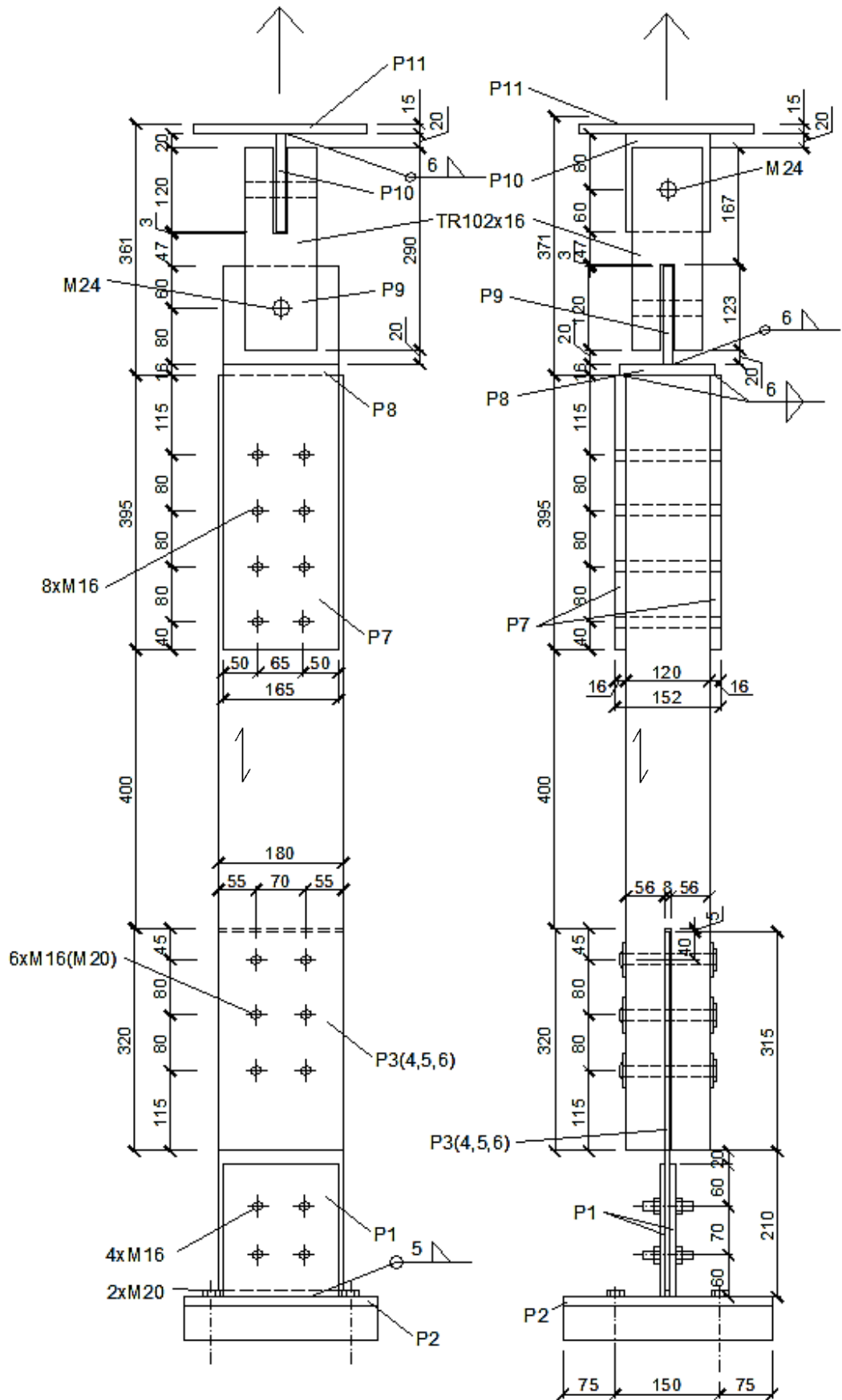


obr. 90 Schéma vzorku 8

7.3 Schéma experimentu

V horní části je zkušební těleso upevněno k hydraulickým zatěžovacím válcům pomocí speciálně vyrobeného zařízení z ocelových svařovaných prvků. Uspořádání plechů je zakresleno na obr. 91. Zde je patrné, že spojení plechů vytváří dva na sebe kolmé klouby umožňující pootočení v obou kolmých směrech. Konstrukce svařence je řešena šroubovým spojením tří ocelových plechů a jednoho uzavřeného kruhové profilu TR102x16 s předvrtanými otvory spojených šrouby průměru 24 mm. Otočné zařízení je přivařeno k ocelovému svařenci z plechů tloušťky 16 mm tvořících tvar U. Prvek je k dřevěnému vzorku připevněn osmi šrouby průměru 16 mm. K připevnění svařence k hydraulickému lisovacímu válci slouží dvanáct šroubů průměru 24 mm, které jsou vkládány do převrtaných otvorů průměru 26 mm v plechu P11.

Spodní část vzorku je kotvena přímo k patce upínacího zařízení viditelné na obr. 85. Kotvicí patka má půdorysné rozměry 300 x 300 mm a předvrtané čtyři otvory průměru 22 mm v osové vzdálenosti 150 mm. Otvory slouží ke snadnému ukotvení zkušebního tělesa k zatěžovacímu stroji čtyřmi šrouby průměru 20 mm. Ke konstrukci patky jsou v kolmém směru přivařeny dva svislé ocelové plechy tloušťky 8 mm. Sevření plechu zkušebního vzorku mezi svislé kotvicí plechy zajišťují čtyři ocelové šrouby průměru 16 mm.



obr. 91 Uložení experimentálního spoje č. 1, 2 a 3 ke zkušebnímu zařízení

Reálné upevnění celé sestavy vzorku č. 3 k zatěžovacímu hydraulickému lisu je znázorněno na obr. 92.



obr. 92 Sestava vzorku č 3

Detail horního ocelového svařence kotvicím dřevěný vzorek je na obr. 93.



obr. 93 Horní uchycení vzorku č. 3

Dle postupu uvedeného v kapitole 4 byly stanoveny únosnosti všech osmi navržených vzorků. Výsledné hodnoty charakteristických a návrhových únosností všech navržených vzorků jsou shrnuty v tab. 13.

tab. 13 Rozpis vzorků a jejich charakteristická únosnost v tahu dle ČSN EN 1995-1-1:2007

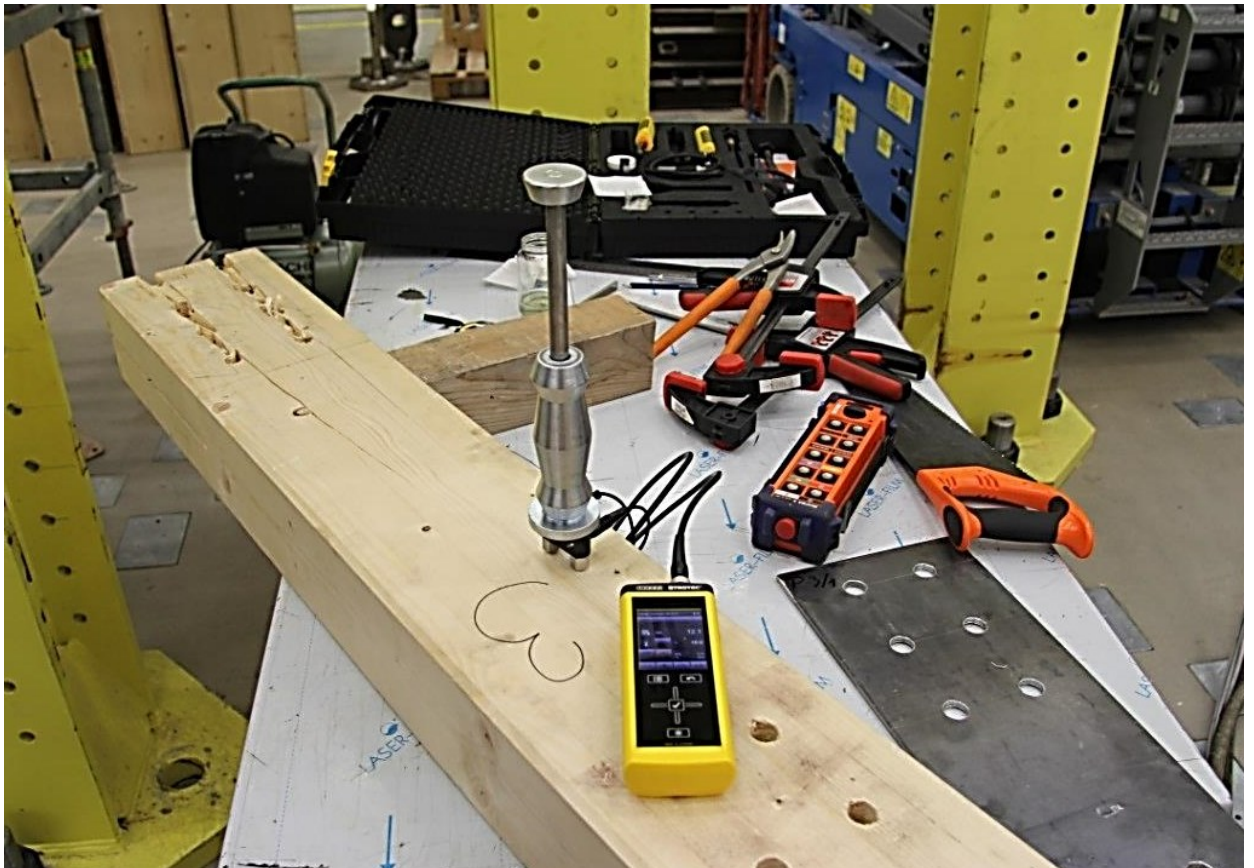
Číslo vzorku	Třída pevnosti dřeva	Svorník	Rozteče a_l [mm]	Únosnost F_{Rd} [kN] dle ČSN EN 1995-1-1	Únosnost F_{Rk} [kN] dle ČSN EN 1995-1-1
1	C24	M16	80	95	138
2	C24	M16	80	95	138
3	GL24h	M16	80	100	145
4	C24	M20	100	136	196
5	C24	M20	100	136	196
6	GL24h	M20	100	142	205
7	C24	M20	200	112	162
8	C24	M20	300	124	179

7.4 Materiálové parametry

Hlavními sledovanými materiálovými parametry důležitými pro správný průběh experimentů jsou vlhkost a hustota dřevěných vzorků.

Vlhkost

Vlhkost vzorků byla stanovena dle normy ČSN EN 13183-2 elektrickou odporovou metodou. Postup stanovení vlhkosti je blíže popsán v kapitole 7.5.1. Pro měření byl použit předem seřízený elektrický odporový vlhkoměr typu T3000 firmy Trotec na fotografii z průběhu měření, obr. 94. Vlhkost dosahovala optimální hodnoty pro experiment 12,0 %. Této hodnoty bylo dosaženo umístěním vzorku do kondičační komory několik dní před zahájením experimentu.



obr. 94 Průběh stanovení vlhkosti vzorku elektrickým odporovým vlhkoměrem

Hustota

Vzorky vyhovují normovým požadavkům na hustotu dřevěných prvků. Pro určení hodnot hustoty byl vybrán vzorek dřeva, který splňuje požadavky stanovené podle ISO ČSN EN ISO 8970:2010 [40]. Hlavním požadavkem na vybraný vzorek dřevěného prvku je, že musí být stejnoměrné jakosti a bez lokálních vad, které mohou ovlivnit výsledky zkoušek. Procentuální odhadnuté vlhkosti a hustotu experimentálních vzorků udává tab. 14.

tab. 14 Rozměry a materiálové vlastnosti dřevěných prvků spoje

Vzorek č.	Šířka [m]	Hloubka [m]	Délka [m]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]	Hustota [kg.m ⁻³]	Vlhkost [%]
3	0,180	0,120	1,290	0,0279	11,997	430	12,0

7.5 Experimentální metody

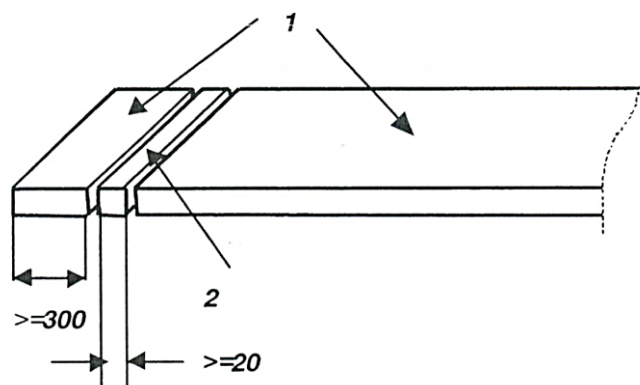
V této kapitole jsou shrnuty experimentální metody použité pro stanovení materiálových vlastností a přípravě vzorku k experimentu.

Chování dřevěných prvků je velice ovlivněno materiálovými veličinami a deformacemi, které jsou závislé na teplotě, vlhkosti a době trvání zatížení. Při analytickém výpočtu jsou tyto proměnné zohledněny součinitelem k_{mod} , který upravuje hodnoty pevnosti materiálu pro výpočty mezních stavů únosnosti a součinitelem k_{def} zvyšujícím přetvoření prvků pro výpočty mezních stavů použitelnosti [3].

7.5.1 Stanovení vlhkosti zkušebního tělesa

Pro zkušební tělesa se obsah vlhkosti a hustota stanovují dle normy ČSN EN 13183 [41], [42], [43], kde jsou popsány 3 způsoby stanovení obsahu vlhkosti vzorku řeziva.

V první části normy je popsán postup stanovení vlhkosti řeziva váhovou metodou, jejímž výsledkem je vyjádření procentního podílu hmotnosti vody obsažené ve vlhkém vzorku a hmotnosti vzorku ve vysušeném stavu. Přesnost váhy vzorku je stanovena na 0,1 g, je-li hmotnost vzorku v suchém stavu větší než 100 g a přesnost 0,01 g, je-li hmotnost vzorku v suchém stavu menší než 100 g. Zkušební těleso se vyřízne z celého průřezu o rozměru nejméně 20 mm ve směru vláken ve vzdálenosti 300 mm od jednoho nebo od druhého čela zkušební vzorku (nebo ze středu, pokud je vzorek kratší než 600 mm), viz obr. 95. Zkušební těleso musí být bez prosmolu a vad jako jsou např. kůra, suky a smolníky. Vyskytují-li se tyto vady, vyřízne se zkušební těleso z nejbližšího bezvadného místa směrem ke středu zkušební vzorku [41].



obr. 95 Pozice zkušebního tělesa; 1 - zkušební vzorek; 2 - zkušební těleso [41]

Vážení zkušebního tělesa probíhá ihned po vyříznutí. Není-li možné zvážit těleso ihned, vloží se do hermeticky uzavřené schránky, aby nemohlo dojít ke změnám jeho vlhkosti, a zváží se během 2 hod. Zvážené zkušební těleso se suší v sušárnách s volnou vnitřní cirkulací vzduchu při teplotě $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$ do ustálení hmotnosti, tedy dokud rozdíly v hmotnosti dvou po sobě následujících vážení v intervalu 2 h nejsou menší než 0,1 %. [41]

Hmotnost vysušeného zkušební tělesa se stanoví bezprostředně po jeho vyndání ze sušárny. Aby se pro dřevo obsahující vysoký podíl těkavých látek (pryskyřice) stanovily přesné výsledky, suší se ve vakuu (tlak < 100 Pa) a při nižších teplotách (max. 50 °C) nebo v exsikátoru s vysoušecí látkou [41].

Vyjádření výsledků se vypočítá jako procentní podíl hmotnosti podle vzorce [41]:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100 \quad (41)$$

kde m_1 je hmotnost zkušební tělesa před sušením [kg];

m_0 hmotnost vysušeného zkušební tělesa [kg];

ω vlhkost, v procentech s přesností na 0,1 %.

Druhým způsobem stanovení vlhkosti je odhad elektrickou odporovou metodou. Zkušebním zařízením je v tomto případě elektrický odporový vlhkoměr, vybavený izolovanými elektrodami. Vlhkoměr se před měřením seřídí podle druhu a teploty dřeva, které bude měřeno. Měření bude probíhat ve směru vláken. Izolované elektrody se používají z důvodu rozdílné vlhkosti dřeva na povrchu a v průřezu. Místo pro zaražení elektrody se určí stejně jako místo výřezu v případě váhové metody a aby špička elektrody byla v hloubce 0,3 násobku tloušťky vzorku řeziva. Výsledek měření se odečte po 2 s až 3 s po zapnutí měřícího okruhu. Odhadnutá vlhkost se poté udává nejméně na nejbližší celé procento [42].

Posledním způsobem stanovení vlhkosti je odhad kapacitní metodou, který je možné provádět pomocí ručního kapacitního vlhkoměru na dřevo nebo pomocí kapacitního kontinuálního vlhkoměru. Ruční kapacitní vlhkoměr s rovnou povrchovou plochou kondenzátorových desek, povrchovými pružinovými elektrodami nebo speciálními měřícími doteky, které nevnikají do dřeva. Před začátkem měření se musí stanovit přesnost kapacitního vlhkoměru, poté se musí nastavit podle hustoty měřeného dřeva nebo průměrné hustoty měřeného druhu dřeva. Při měření je důležitý kontakt mezi přístrojem a měřeným kusem řeziva. Zkušební těleso se vyřízne stejným způsobem jako v případě měření elektrickým vlhkoměrem [43]. Kapacitní kontinuální vlhkoměr připojený na vyhodnocovací jednotku sestává z pevné nosné konstrukce, na níž je namontováno jedno nebo více čidel, po nichž se posouvá řezivo po délce nebo napříč. Čidlo musí být instalováno ve výrobní lince na dobře přístupné, snadno udržovatelné místo prosté vibrací. Čidlo a přívodní kabel musí být stíněny proti elektromagnetickému působení. Měřené místo musí být udržováno bezprašné a čisté např. pomocí trysek stlačeného vzduchu. Systém měření vlhkosti dřeva se uvede do výchozího nastavení pomocí kalibrační desky. Před změnou měřícího modu se zvolí vhodný měřící program. Výsledky odhadu se vyjádří zaokrouhleně na celá procenta [43].

Metody odhadování vlhkosti kusu řeziva jsou vhodné pro materiál s vlhkostí mezi přibližně 7 % a 30 %. Dřevo by nemělo být ošetřeno povrchovými úpravami, jako jsou ochranné a protipožární prostředky, které ovlivňují přesnost měření a vyžadují speciální kalibraci

měřidla. Pro stanovení vlhkosti odhadem elektrickou odporovou metodou a kapacitní metodou jsou v normě udány počty odběrů vzorků a četnosti měření [42], [43].

7.5.2 Kondicionování zkušebních těles

Zkouší se tělesa kondicionovaná v prostředí s teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a $(65 \pm 5) \%$ relativní vlhkosti. Zkušební těleso je kondicionováno, dosáhne-li konstantní hmotnosti. Konstantní hmotnosti je dosaženo, pokud se výsledky dvou následujících vážení, provedených v intervalu 6 hod, nelišily více než o 0,1 % hmotnosti zkušebního tělesa [44].

7.5.3 Hustota dřeva

Další důležitou vlastností dřevěného prvku je jeho hustota. Hustota dřeva udává hmotnost jeho objemové jednotky, vyjadřuje se tedy nejčastěji v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jedná se o vlastnost, která výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Z mnoha studií vyplývá, že těžké dřevo je pevnější, tvrdší a odolnější proti opotřebení než lehké dřevo [25]. Nejzásadnějšími faktory ovlivňujícími hustotu dřeva je především jeho vlhkost, šířka ročních letokruhů, podíl letního dřeva, poloha v kmeni a věk stromu. Hustota smrkového dřeva je dle normy ČSN EN 338 [26] stanovena na hodnotu $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tato hodnota se však často liší vzhledem k nedokonalostem dřevěných prvků. Je proto vhodné tuto vlastnost určovat experimentálně na vzorku odpovídajícímu materiálovým vlastnostem dřeva použitého v konstrukci. Zkoušení hustoty na vzorku spočívá v určení hmotnosti a objemu dřeva při dané vlhkosti, z čeho vyplývá rovnice (38):

$$Q = \frac{m}{V} \quad (42)$$

kde Q je hustota dřeva [kg/m^3];

m hmotnost dřeva [kg];

V příslušný objem [m^3].

7.5.4 Stanovení modulu pružnosti a pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny

Dřevěné prvky využívané ve stavebnictví mívají zpravidla garantované hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v tahu od výrobce. Pokud nejsou hodnoty těchto vlastností známé, postupuje se při jejich určování dle ČSN EN 408+A1 [44]. Jsou zde uvedeny přesné průběhy zatěžování. Rychlost zatěžování musí být konstantní a rychlost poměrného přetvoření tělesa nesmí být větší než 0,000 05/s. Zatěžování probíhá tak, aby maximální působící zatížení nepřekročilo mez úměrnosti a nezpůsobilo poškození zkušebního tělesa. Působící zatížení a deformace tělesa se stanovují s přesností 1 %, nebo pro deformace menší než 2 mm, s přesností 0,02 mm [44].

Modul pružnosti v tahu rovnoběžně s vlákny $E_{t,0}$ je dán vztahem

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (43)$$

kde $F_2 - F_1$ je přírůstek zatížení na přímkové části křivky zatížení-deformace [N];
 $w_2 - w_1$ přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$ [mm].

Pro stanovení pevnosti se zatěžuje při konstantní rychlosti posunutí zatěžovací hlavy, která se nastaví tak, aby se dosáhlo maximálního zatížení v průběhu (300 ± 120) s. Pevnost v tahu $f_{t,0}$ je dána vztahem [44]:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (44)$$

kde F_{max} je největší síla [N];
 A plocha průřezu [mm²].

Vzhledem ke složitosti a vysokým nákladům na experimentální stanovení modulu pružnosti budou pro numerické modelování využity doporučeného hodnoty modulu pružnosti pro smrkové dřevo. Hodnoty budou převzaty z odborné literatury viz kapitola 3.7.

7.5.5 Požadavky na průběh zkoušek

Pro získání správných hodnot deformací spojů z experimentů je jejich průběh popsán v příslušné normě. Pro zkoušky spojů s mechanickými spojovacími prostředky je průběh zatěžování předepsán v ČSN EN 26891 [17] obr. 96

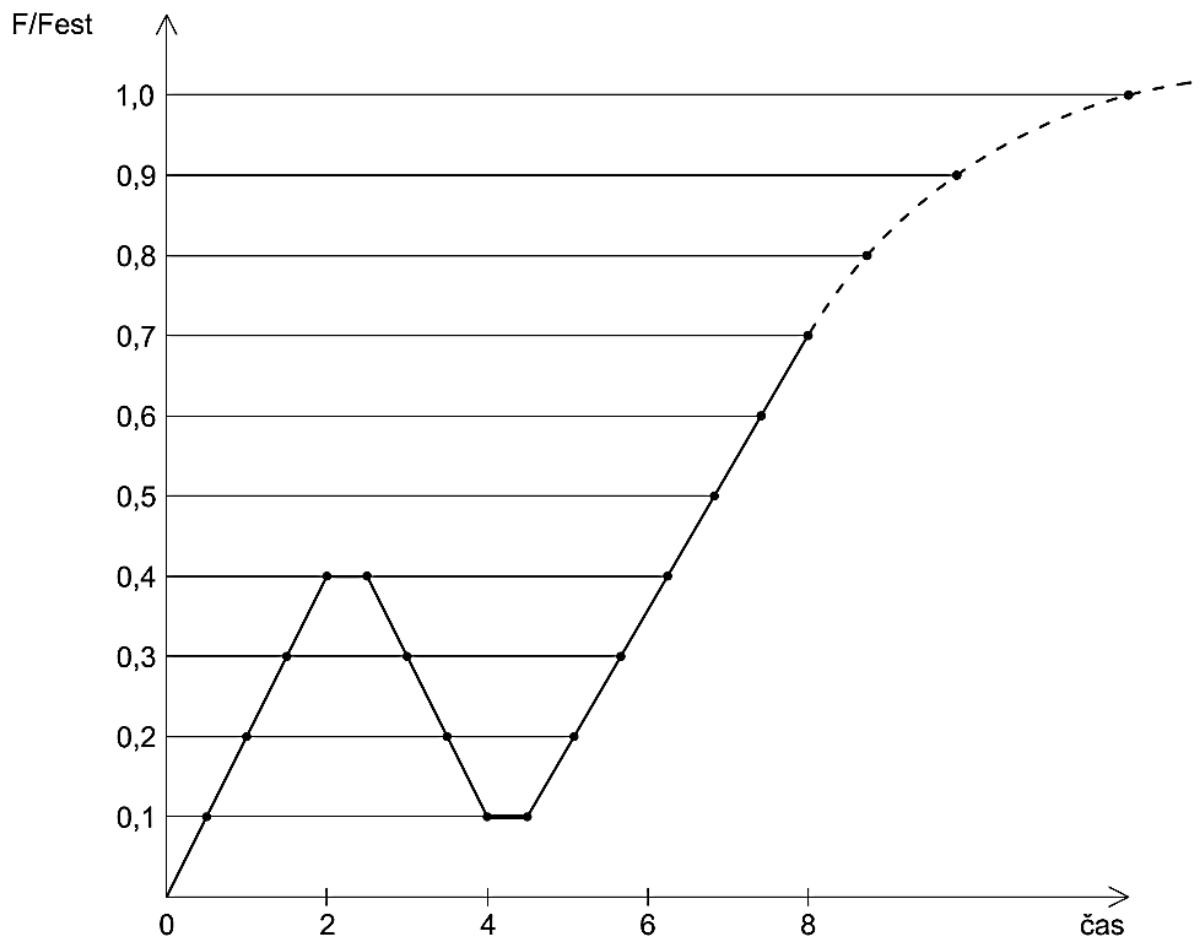
- zatížení zkušební tělesa na úroveň 40 % předpokládané síly ve spoji;
- výdrž 30 sekund;
- snížení intenzity zatížení na úroveň 10 % předpokládané síly ve spoji;
- výdrž 30 sekund;
- plynulé zatěžování do porušení vzorku nebo posunutí 15 mm.

Pod hodnotu 70 % předpokládané síly ve spoji je nutno dodržet konstantní rychlost zatěžování, popř. posunutí 20 % za minutu ± 25 %. Nad hodnotu 70 % předpokládané síly ve spoji se zatěžuje při stálé rychlosti posunutí, která se stanoví tak, aby se dosáhlo porušení nebo posunutí 15 mm v průběhu přídavné doby 3 až 5 minut (celková doba zkoušení je asi 10 až 15 minut).

Zkouška je přerušena při dosažení mezního zatížení nebo při hodnotě posunutí 15 mm. Při speciálních zkouškách může být cyklus předběžného zatížení do 40 % předpokládané síly ve spoji vypuštěn, při odpovídajícím přízpusobení na celkovou dobu zkoušky.

Pro každé těleso se zaznamenává posunutí i při maximálním zatížení. Pokud by nebyl uvažován normou určený diagram zatížení - posunutí, měří se posunutí obvykle při každém

přírůstku zatížení o 10 % předpokládané síly ve spoji. Zatížení, vyvolané před nebo při dosažení posunutí 15 mm, se zaznamená pro každé zkušební těleso jako síla maximálního zatížení v newtonech.



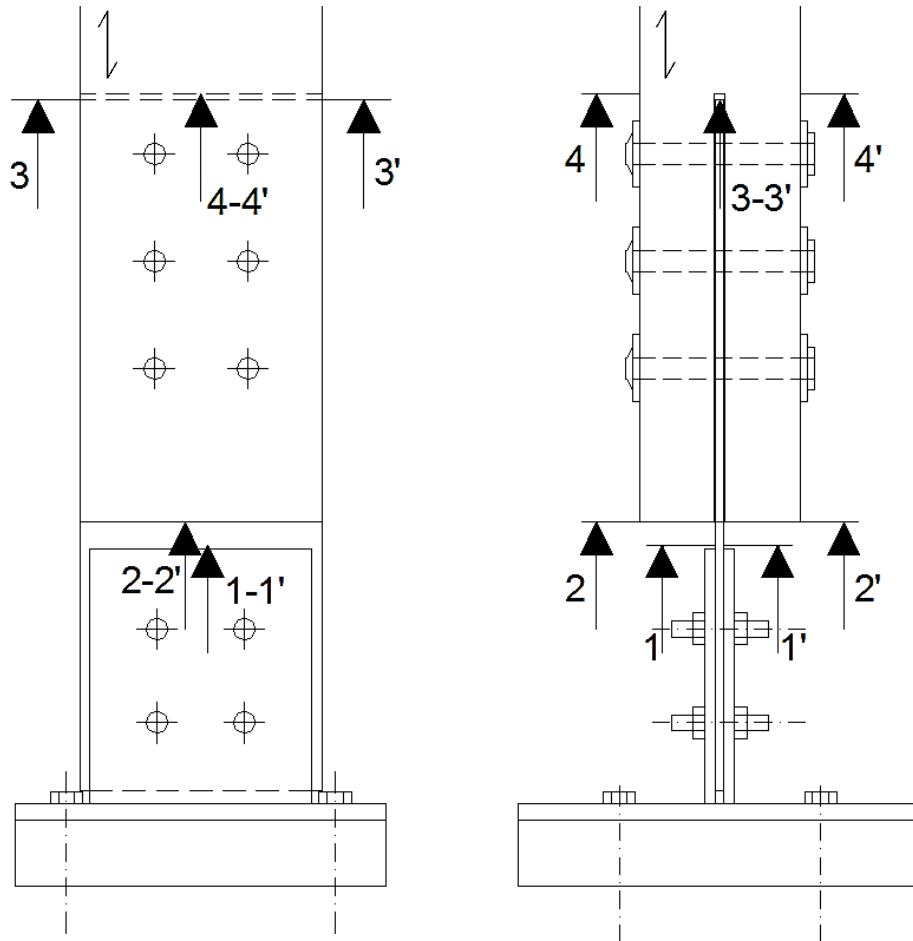
obr. 96 Průběh zatěžování dle ČSN EN 26891 [17]

Když se v průběhu zkoušek odchyluje průměrná hodnota maximálního zatížení již provedených zkoušek o více než 20 % od odhadnuté hodnoty předpokládané síly ve spoji, potom se pro další zkoušky hodnota předpokládané síly ve spoji přiměřeně upraví. Stanovené hodnoty maximálního zatížení se mohou zahrnout do celkových výsledků bez korekce. Hodnoty posunutí a modulů posunutí se v tomto případě upraví, aby odpovídaly korigované hodnotě předpokládané síly ve spoji.

Do zkušebního protokolu se zaznamenávají údaje o skutečném průběhu zkoušek. Je popsán druh a hustota dřeva, jakost, charakteristická pevnost a povrchová úprava materiálů, rozměry vzorku, postupy zatěžování a jednotlivé výsledky zkoušek.

7.6 Měřící zařízení

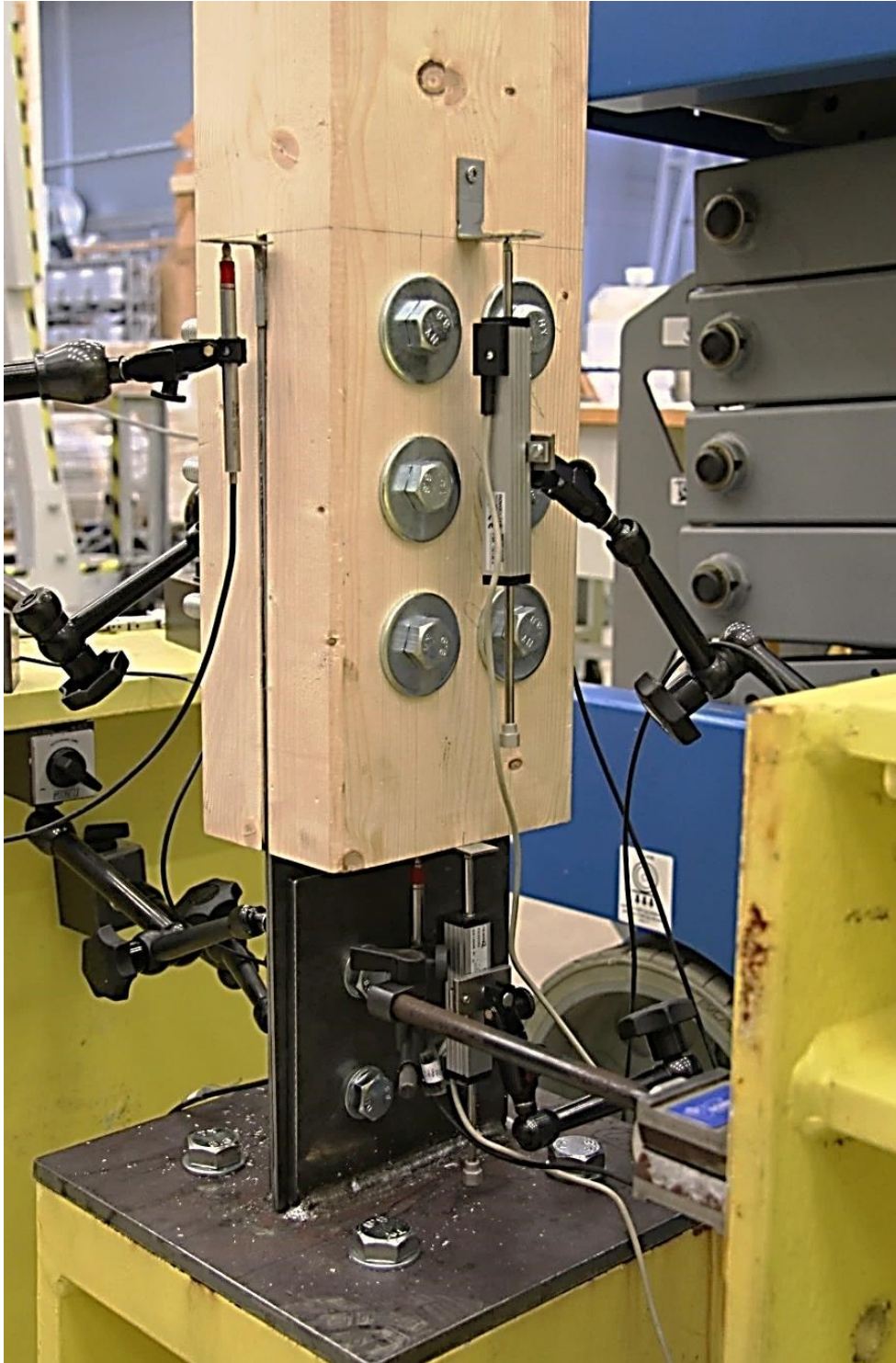
Po zdokumentování skutečných rozměrů zkušebních těles včetně vad a imperfekcí byl vzorek připraven na zátěžovou zkoušku. Navržený vyztužený spoj byl zkoušen na schopnost odolávat svislému tahovému namáhání rovnoběžně s vlákny. Experimentálně zjišťovanými parametry byly posun ocelového plechu vzhledem k dřevěnému prvku a deformace spoje v předem stanovených sledovaných bodech, viz obr. 97.



obr. 97 Schéma spoje s vyznačením bodů sledovaných během zatěžování: 1 - ukončení sevření plechu zkoumaného spoje (cca 1 cm nad patním prvkem); 2 - spodní okraj dřevěného prvku; 3 - horní okraj ocelového plech; 4 – horní zakončení výřezu ve dřevěném prvku

.Během zatěžování je měřen a digitálně zaznamenáván posun sledovaných bodů spoje, celkové deformace spoje a způsob jeho porušení. Byly použity digitální technologie měřící zatížení a deformace během zatěžování bez nutnosti přerušené zatěžování. Předpokládaným výstupem z experimentálního měření jsou hodnoty relativní vzdálenosti ocelového plechu vůči dřevěné části spoje v závislosti na působící síle. Pro zaznamenávání deformací v průběhu zkoušek slouží příložené snímače dráhy, které byly ke každému prvku připevněny ve sledovaných bodech vyznačených na schématu vyobrazeném na obr. 97. Jedná se o čtyři páry hlavních bodů vypovídající o průběhu deformací celého vzorku vůči zatěžovacímu stroji. Snímače dráhy označené čísla 1, 1', 3 a 3' jsou snímače induktivní, které se využívají pro měření menších

deformací do rozsahu 10 mm, které jsou na ocelovém plechu očekávány. Snímače označené čísla 2, 2', 4 a 4' jsou potenciometrické snímající posun v rozsahu až 75 mm, jsou tedy využity ke sledování deformací dřevěného prvku. Ze schématu není jasně patrné, že body 1 a 1' jsou umístěny na plíščích připevněných k ocelovému plechu zkoumaného spoje nedotýkající se vertikálních plechů připevněných ke kotvící patce. Na obr. 98 je spoj č. 3 s osazenými příložnými snímači dráhy připravený k měření deformace během experimentálního zatěžování.



obr. 98 Osazení příložných snímačů dráhy pro měření deformace spoje

8 Závěr

Práce shrnuje současné přístupy k návrhu spojů dřevěných konstrukcí s ocelovými plechy. Prezentované tuzemské a zahraniční studie se zabývají chováním spojů zatěžovaných tahem. Spoje s ocelovými výztuhami při správném návrhu zajišťují spolehlivý přenos vnitřních sil a vysokou únosnost.

V práci jsou spoje modelovány metodou konečných prvků. Model věrohodně popisuje spoje. Pro předpověď chování byla však navržena zjednodušení. Vzhledem k ortotropním vlastnostem materiálu a přirozeně se vyskytujícím nedokonalostem, například suky a trhliny, je obtížné přesně definovat materiálové vlastnosti. Hodnoty modulu pružnosti, Poissonových konstant a modulu pružnosti ve smyku byly převzaty z literatury. Dřevo během zatěžování vykazuje nevratné plastické deformace již při nízkých hodnotách zatěžovací síly. Uvažováním lineárních elastických vlastností materiálu dřeva vznikají ve výsledcích nepřesnosti.

Numerický model pro pouze elastické deformace dřevěného prvku byl verifikován na zjednodušeném analytickém modelu využívajícím vztahy plynoucí z Hookova zákona. Numerický model v pružné oblasti pracovních diagramů dřeva vykazuje velmi dobrou shodu s výsledky analytického modelu.

Numerický model jednoho z navržených spojů byl verifikován pomocí vytvořeného analytického modelu spoje. K porušení spoje dochází překročením maximálního tahového namáhání dřeva. Únosnost stanovená numerickým modelováním vyšla vyšší v porovnání s analytickým výpočtem podle platných norem.

Model spojů věrohodně popisuje průběh deformace spoje zatěžovaného osovou tahovou silou. Tvar porušení byl získán zatěžováním pouze do času porušení experimentálního vzorku. Do tohoto okamžiku odpovídá průběh posunu reálného vzorku numerické simulaci. Únosnost stanovená analytickým výpočtem udává nižší hodnoty únosnosti než experiment. Experiment a numerický model prokázali spolehlivost návrhu podle norem ČSN EN.

Další práce v problematice

Zpřesněný materiálový model lze vytvořit v podprogramu UMAT programu ABAQUS v programovacím prostředí FORTRAN. Vytvořený model umožní popis plastických deformací dřevěného prvku.

V rámci práce byly připraveny plánované zkoušky v laboratoři experimentálního centra UCEEB v Buštěhradě. Plánuje se zkoušet osm vzorků. Spoje se liší v počtu navržených svorníků, jejich roztečích, v třídě pevnosti dřevěného prvku a rozměrech prvků. Ze vzorků byl vybrán jeden reprezentativní, kterým se daná práce blíže zabývá. Hodnoty deformací v průběhu jeho zatěžování budou sloužit k validaci vytvořeného numerického modelu.

V příloze Pilotní zkouška je popsán průběh a vyhodnocení jednoho z navržených vzorků. Zkoušky podle připravených postupů zatěžování poslouží k validaci vytvořeného numerického

modelu v programu ABAQUS. Naměřené hodnoty veličin sledovaných během reálného zatížení vzorků budou využity pro porovnání s vytvořeným numerickým modelem spoje.

Pro validaci zbývajících modelů je doporučeno provést studii na citlivosti sítě. Zjemnění sítě vede ke zvýšení počtu výpočetních uzlů a tedy vyšším nárokům na výpočetní techniku a vzroste doba výpočtu. V modelu prezentovaném v práci dochází ke správnému průběhu deformace, avšak v blízkosti svorníků dochází k nepřesnostem. V dřevěném prvku nejsou deformace dostatečně detailně vykresleny a bude vhodné zjemnit výpočetní síť. Řešením je modelovat pouze jednu osu symetrie a zbylá část spoje bude nahrazena podporami zajišťujícími model proti kroucení prvků.

Literatura

- [1] STRAKA, Bohumil a Milan ŠMAK. Halové stavby s dřevěnými obloukovými, vazníkovými a rámovými nosnými dílci. *Časopis stavitelství* [online]. 2007 (10) [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/>
- [2] STRAKA, Bohumil a Karel SÝKORA. *Dřevěné konstrukce: Spoje dřevěných konstrukcí* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.kdk.fce.vutbr.cz/DownloadHandler.ashx?pg=3ec55b2c-b279-4259-a4fa-2efbb78e0d8d§ion=7e195450-8836-42a1-9154-78a77ef9adce&file=KS-OD3_ZS_2008-09_Osnova-Drevene_konstrukce-08.doc
- [3] HRADIL, Petr. *Analýza působení polotuhých mechanických spojů v dřevěných konstrukcích: Analysis of semi-rigid behaviour of mechanical joints in timber structures* [online]. Brno, 2007 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/37783241-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-fakulta-stavebni-ustav-kovovych-a-drevenych-konstrukci-ing-petr-hradil.html>. Disertační práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Bohumil Straka, CSc.
- [4] MIKOLÁŠEK, David, Antonín LOKAJ, Oldřich SUCHARDA a Jiří BROŽOVSKÝ. *Několik typů zesílení taženého ocelového spoje dřevěné kulatiny*. In: TZB-info [online]. Ostrava: Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava, 2016 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/13995-nekolik-typu-zesileni-tazeneho-oceloveho-spoje-drevene-kulatiny>
- [5] HOUŠKA, Petr. Gang-Nail. *Dřevo a stavby* [online]. 2013 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/>
- [6] ŠMAK, Milan. *Spoje s ocelovými prvky v dřevěných konstrukcích* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, 2011 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/7619-spoje-s-ocelovymi-prvky-v-drevenych-konstrukcich>
- [7] POJAR, Petr. Představujeme příhradové nosníky GREIM. *České stavby* [online]. 2015 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/>
- [8] *MKD - Dřevěné příhradové vazníky*. In: STŘECHY92 [online]. s. 18 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.strechy92.cz/2-pohledove-vazniky-mkd.html>
- [9] STRAKA, Bohumil, Zdeněk VEJPUSTEK a Petr HRADIL. *Nové dřevěné konstrukce zastřešení budov*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí [online]. 2003 [cit. 2018-03-11].

- [10] SCHICKHOFER, Gerhard a Jaroslav SANDANUS. *Inžinierske spoje*. In: *ProLignum* [online]. 2010, s. 79 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.prolignum.cz/fileadmin/prolignum/media.cz/11_Gerhard_Schickhofer-Jaroslav_Sandanus.pdf
- [11] KALHOUS, Tomáš. *Posouzení spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru*. Praha, 2018. Magisterská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [12] DRBÁLKOVÁ, Pavlína. *Nová rozhledna Bohdanka v obci Bohdaneč*. In: *Archiweb, s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/n/press/nova-rozhledna-bohdanka-v-obci-bohdanec>
- [13] STRAKA, Bohumil a Milan ŠMAK. *Kolíkové spoje v dřevěných konstrukcích: Experimenty - navrhování - použití v konstrukcích*. In: *TZB-info* [online]. 2017 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/16516-kolikove-spoje-v-drevenych-konstrukcich>
- [14] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [15] JOHANSEN, K. Theory of timber connections. *International association for bridge and structural engineering (IABSE)*. Pub. 9; 1949, 249–622.
- [16] SEDLÁK, Petr. *Statická analýza spoje dřevěné konstrukce*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] ČSN EN 26891. *Dřevěné konstrukce. Spoje s mechanickými spojovacími prostředky: Všeobecné zásady pro zjišťování charakteristik únosnosti a přetvoření*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [18] XU, B.H., M. TAAZOUNT, A. BOUCHAÏR a P. RACHER. Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints. *Construction and Building Materials* [online]. 2009, **23**(9), 3043-3052 [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.04.006. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809001172>
- [19] VEJPUSTEK, Zdeněk. *Analýza spojů dřevěných konstrukcí s vkládanými styčnickovými plechy* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.vejpustek.cz/DP/Vejpustek_TezeText.pdf. Doktorská disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [20] DORN, Michael, Karin DE BORST a Josef EBERHARDSTEINER. Experiments on dowel-type timber connections. *Engineering Structures* [online]. 2013, **47**, 67-80 [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.010. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029612004889>

- [21] KHAROUF, N., G. MCCLURE a I. SMITH. *Elasto-plastic modeling of wood bolted connections* [online]. 2003, **81**(8-11), 747-754 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00482-0. ISSN 00457949. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794902004820>
- [22] GÖDRICH, Lukáš. *Diskrétní modelování čelní desky*. Praha, 2017. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [23] MIKEŠ, Karel. *Styčníky dřevěných konstrukcí s vlepovanými závitovými tyčemi* [online]. Praha, 2001 [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/23655028-Pisemna-prace-k-doktorske-zkousce.html>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Vašek, CSc.
- [24] PĚNČÍK, Jan. Modelování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu s kritérii porušení. *Stavební obrzor* [online]. 2014, (2), 7 [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1113491-Modelovani-dreva-pomoci-ortotropniho-materialoveho-modelu-s-kriterii-poruseni.html>
- [25] POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dreva. 2*. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [26] ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti. 2*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [27] MILCH, Jaromír. Determination of the elasto-plastic material characteristics of Norway spruce and European beech wood by experimental and numerical analyses. *Holzforschung*. 2016, (11), 70.
- [28] SCHMIDT, Jörg a Michael KALISKE. Models for numerical failure analysis of wooden structures. *Engineering Structures*. 2009, (2), 31.
- [29] HASSANIEH, A. Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study. *Engineering Structures*. 2017, (1), 138.
- [30] GREEN, D., J. WINANDY a D. KRETSCHMANN. Wood handbook-wood as an engineering material. *Madison : Forest Products Laboratory*. 1999.
- [31] GUAN, Z. a E. ZHU. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings. *Engineering Structures*. 2009, 31.
- [32] STANZL-TSCHEGG, S., D. TAN a E. TSCHEGG. New splitting method for wood fracture characterization. *Wood Science and Technology*. 1995, 29.
- [33] DAHL, K. a K. MALO. Nonlinear shear properties of spruce softwood: Numerical analyses of experimental results. *Composites Science and Technology*. 2009, 69.

-
- [34] *Abaqus Analysis User's Guide: Ver. 6.14 Documentation* [online]. Johnston: Dassault Systèmes Simulia Corporation, 2014 [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usi/default.htm>
- [35] HORÁK, Zdeněk. České vysoké učení technické v Praze. *Metoda konečných prvků pro biomechaniku* [online]. b.r. [cit. 2018-09-10].
- [36] MIRIANON, Florian, Stefania FORTINO a Tomi TORATTI. A method to model wood by using ABAQUS finite element software: Part 1. Constitutive model and computational details. *VTT Publications 687* [online]. Espoo, 2008, 51 [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <https://www.vttresearch.com/impact/publications>
- [37] Element types. *Web.mit.edu* [online]. 2014 [cit. 2018-10-10].
- [38] *Mechanická laboratoř: Testování mechanických vlastností materiálů a konstrukcí* [online]. In: Buštěhrad: Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze, 2017, s. 2 [cit. 2018-04-25].
- [39] *Zkušební haly a jejich možnosti*. In: Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze [online]. Buštěhrad, 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.uceeb.cz/aktuality/zkusebni-haly-jejich-moznosti>
- [40] *ČSN EN ISO 8970:2010 Dřevěné konstrukce - Zkoušení spojů s mechanickými spojovacími prostředky - Požadavky na hustotu dřeva*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [41] *ČSN EN 13183-1. Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [42] *ČSN EN 13183-2. Vlhkost vzorku řeziva - Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [43] *ČSN EN 13183-3. Vlhkost vzorku řeziva - Část 3: Odhad kapacitní metodou*. 2005. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [44] *ČSN EN 408+A1. Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo: Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

Seznam použitých programů

Microsoft office – <https://products.office.com/cs-cz/home>

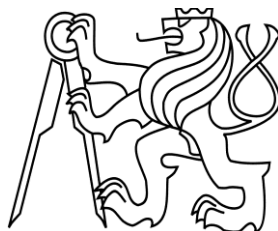
AutoCAD 2012 – <https://www.autodesk.cz/products/autocad/overview>

ABAQUS FE 6.14-1 – <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

POKROČILÝ NÁVRH SPOJŮ S OCELOVÝMI PRVKY V DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍCH

ADVANCED DESIGN OF JOINTS WITH STEEL ELEMENTS IN TIMBER STRUCTURES

PŘÍLOHA

Bc. Kristýna Vopatová

vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

2019

Příloha: Pilotní zkouška

Dne 18. 12. 2018 proběhla zkouška prvního vzorku z osmi navržených variant. Jednalo se o vzorek č. 3, tedy spoj se šesti svorníky M16 a dřevěným prvkem z lepeného lamelového dřeva. Během zatěžování proběhla plánovaná měření. V následující kapitole jsou popsány průběhy zatěžování a výsledky včetně deformací spoje.

Průběh zatěžování

Zkoušky jsou navrženy pro průběh zatěžování definovaný v normě ČSN EN 26891 [17], blíže popsaného v kapitole 7.5.5.

Pro stanovení tahové síly působící během zkoušek byla podle ČSN EN 1995-1-1:2007 [14] stanovena hodnota předpokládané síly ve spoji uvedená v předchozí podkapitole práce. Podle hodnoty maximální charakteristické tahové síly ve spoji F_{Rk} [kN] je následně sestaven zatěžovací diagram průběhu zkoušky.

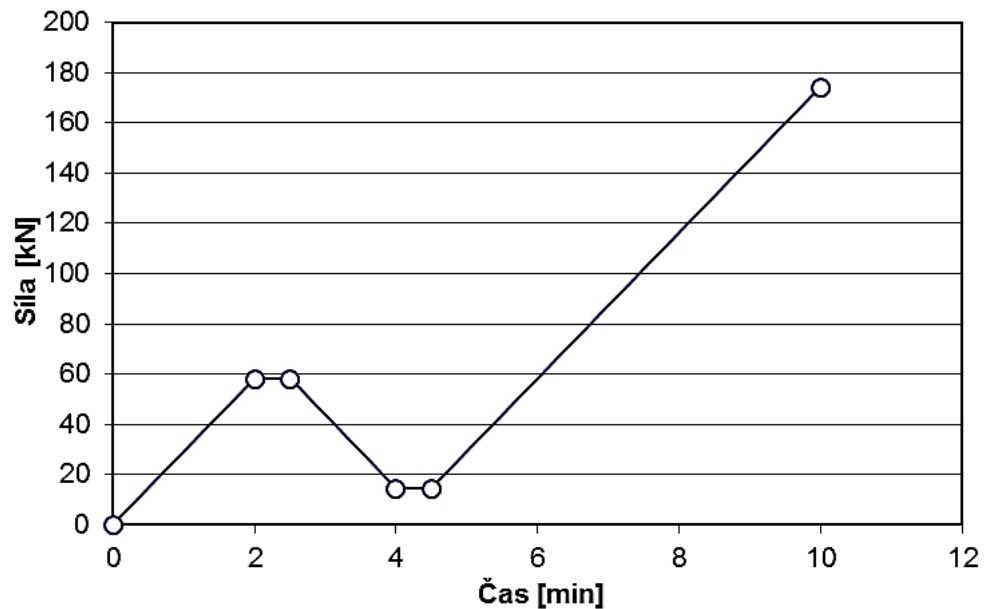
Diagram uvažuje sílu hodnoty 40 % předpokládané síly ve spoji. Po prodlevě je těleso odtíženo na úroveň 10 % předpokládané síly ve spoji. Konečnou fází bylo plynulé zatěžování až do porušení.

tab. 15 Průběh zatěžovacího diagram pro zkoušku vzorku č. 3

Krok č.	Průběh zatížení	Počáteční zatížení [kN]	Konečné zatížení [kN]	Čas [s]	Rychlost zatěžování [kN/min]
1	Přítěžování z 0 kN do $0,4 F_{Rk}$	0	58	120	29
2	30 s na $0,4 F_{Rk}$	58	58	30	0
3	Odtěžování $0,4 F_{Rk}$ do $0,1 F_{Rk}$	58	14,5	90	29
4	30 s na $0,1 F_{Rk}$	14,5	14,5	30	0
5	Přítěžování z $0,1 F_{Rk}$ do ukončení zkoušky	14,5	-	-	29

Průběh zkoušky lze rozdělit do pěti zatěžovacích kroků, viz tab. 15. Průběh zkoušky vzorku č. 3 je graficky vyneseno na obr. 99. Během zatěžování vzorku s únosností podle analytického výpočtu 145 kN bylo během prvního kroku trvajícím 2 min vyvoláno zatížení hodnoty 58 kN. Podle požadavků byla do dosažení hodnoty tahové síly 101,5 kN dodržena konstantní rychlost zatěžování 29 kN/min. Druhý krok představoval prodlevu na hodnotě zatížení dosažené v předchozím kroku. Touto hodnotou zatížení se bez změny zatěžovalo následujících 30 s. Po fázi relaxace následoval krok klesajícího zatížení po dobu 90 s až na hodnotu 14,5 kN. Na této snížené hodnotě zatížení pokračovala zkouška 30 s. Konečnou

fázi zkoušky bylo zatěžování až do dosažení podmínky uvedené v ČSN EN 26891 [17]. Nad hodnotu 97 kN se zatěžovalo stálou rychlostí posunutí uzpůsobenou, aby přídatná doba nepřekročila časový limit 5 min.



obr. 99 Zatěžovací diagram pro průběh zkoušky vzorků č. 3

Lze předpokládat, že z důvodu závady na servoventilu zatěžovacího válce proběhla zkouška jiným způsobem. Hydraulický válec nerespektoval příkaz průběhu a rychlosti změny tahové síly z řídicí stanice. Skutečný průběh vykazoval vyšší rychlosti zatížení a neproběhly fáze relaxace a odtěžování. Norma zmíněný průběh pouze doporučuje a uvádí toleranci pro úpravu diagramu s možností vypuštění fází relaxace a odtížení. Výsledky naměřené během zatěžování lze zpracovat a využít pro validaci numerického modelu.

Pro zbylé zkoušky se předpokládá plánovaný průběh zatěžování. Případně bude zatěžovací diagram přizpůsoben podle provedeního experimentu.

Vyhodnocení experimentu

Průběh deformace

V první fázi nedocházelo k výraznému zvyšování síly, protože spoj byl navržen s vůlí například v otvorech v ocelovém plechu pro vložení spojovacích prostředků včetně horního uchycení dřevěného spoje k zatěžovacímu válci. Během první fáze, při posunu zatěžovacího válce o 2,5 mm, docházelo ke zpevnění celé sestavy. Po dalším zatížení a zpevnění celého vzorku začalo postupně docházet k deformacím vzorku. Prvními viditelnými deformacemi byly praskliny vytvořené v řadě spojovacích prostředků. Nárůst koncentrované síly vyvolal postupné otláčování otvorů dřevěného prvku vloženými svorníky, dokud nedošlo při hodnotě zatěžovací síly 180,2 kN k porušení spoje a spojovací prvky vytlačily část dřevěného prvku ze zkoušeného

spoje. Po tomto porušení byla zkouška přerušena. Na obr. 100 jsou viditelné deformace po skončení zatěžovací zkoušky. Z fotografie je patrné, že v poslední fázi zatěžování snímače dráhy nebyly schopny snímat posuny sledovaných bodů, protože deformace překročily rozsah snímačů.



obr. 100 Fotografie spoje po ukončení zatěžovací zkoušky s omezeným rozsahem snímačů dráhy

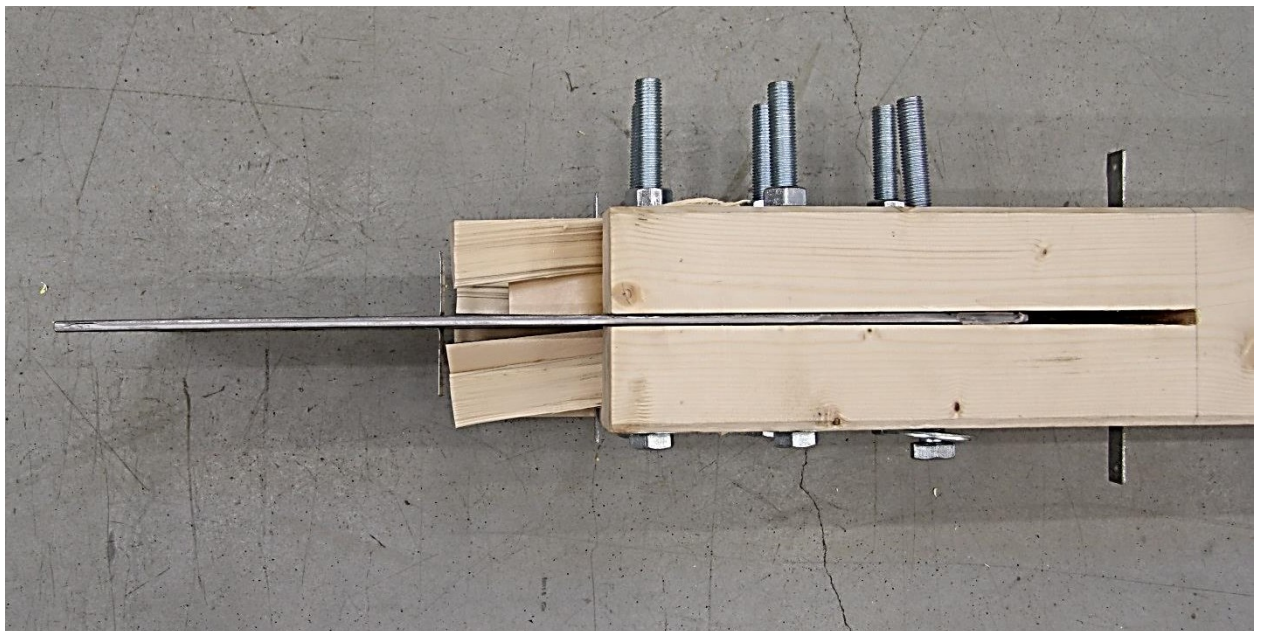
Vlivem tahu došlo k výrazným deformacím spoje. Dle předpokladů mělo dojít k výraznému otláčení a místy k rozštěpení dřevěného prvku. Nejčastějším porušením spojů bývá otláčení otvoru pro vložení svorníku a při dalším zatěžování následné rozštěpení otvoru. V případě zkoušeného vzorku číslo 3 došlo vlivem vysoké rychlosti nárůstu síly k výraznému porušení, který nastává při působení tahové síly na spoj se skupinou spojovacích prostředků.

Hodnoty posunutí bodu 3 na horním okraji ocelového plechu v době porušení spoje činily pouze 4,6 mm. Stejné posunutí v době působení maximální síly bylo zaznamenáno i v bodě 1. Shodné hodnoty posunů těchto bodů teoreticky znamenají nulové protažení ocelového plechu.

Dřevěný prvek dle předpokladů vykazoval větší hodnoty posunutí. Posunutí bodu 4 umístěného na horním okraji výřezu v době porušení spoje činí 8,7 mm. Posunutí v bodě 2, tedy dolním okraji dřevěného prvku dosáhlo hodnoty 8,8 mm. Větší hodnota, i když jen malého rozdílu posunu bodu 2 v porovnání s bodem 4, značí protažení dřevěného prvku v délce spoje.

Vzdálenost mezi měřenými body 1 a 4 vyjadřuje délku protažení celého spoje, která činí 4,1 mm.

Pro reálnou konstrukci by bylo vhodné v místě vysokého tahového namáhání navrhnout spoj s odskočením každé řady spojovacích prostředků mezi sebou o polovinu rozteče stejně jako vpravo nahoře na obr. 11 na str. 21 nebo zvětšit rozteče spojovacích prostředků v řadě. Zajistilo by se lepší spolupůsobení skupiny spojovacích prostředků a zamezení nadměrných deformací nejvíce zatížených svorníků. Ohyb svorníků je patrný z obr. 101. Je zde vidět větší ohyb svorníku v horší části, vzhledem k umístění při zatěžovací zkoušce, spoje ve směru vláken.

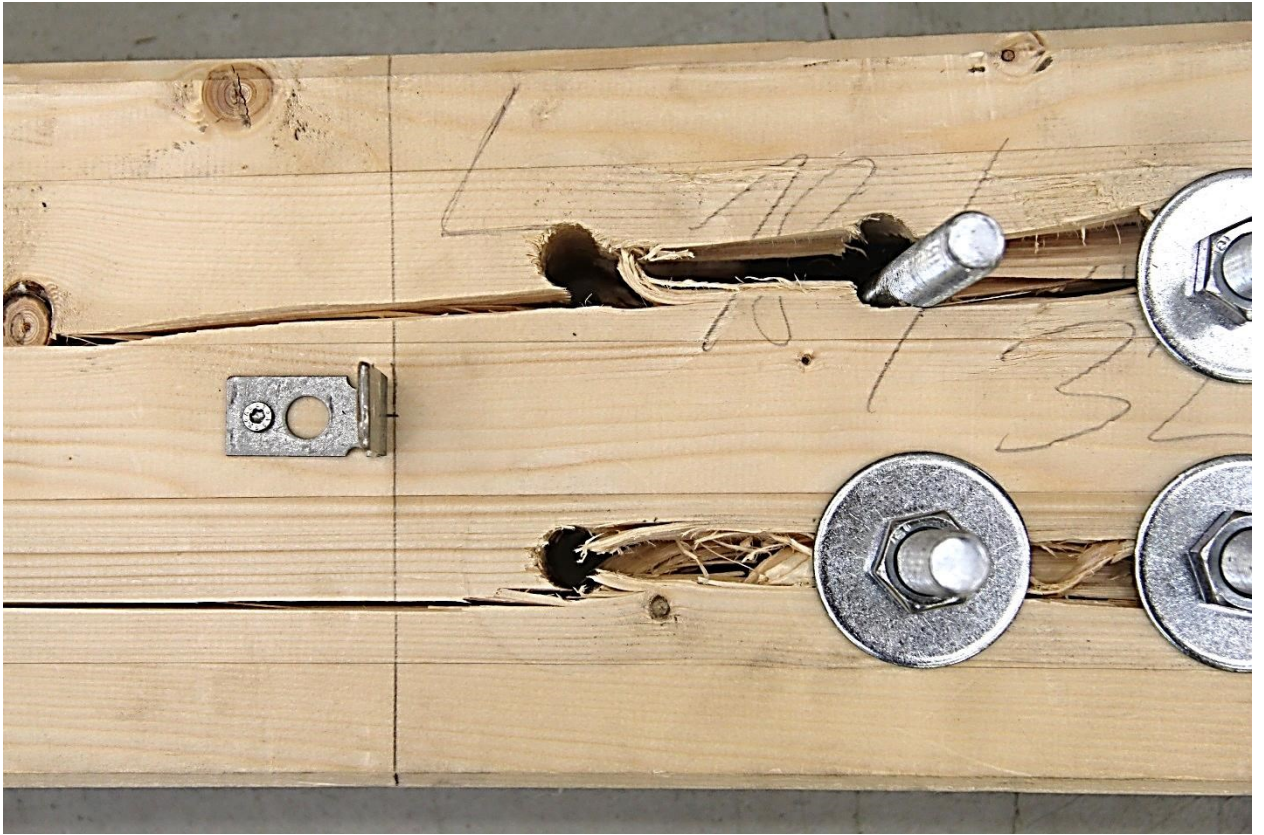


obr. 101 Horní pohled na zdeformovaný spoj po provedení zatěžovací zkoušky

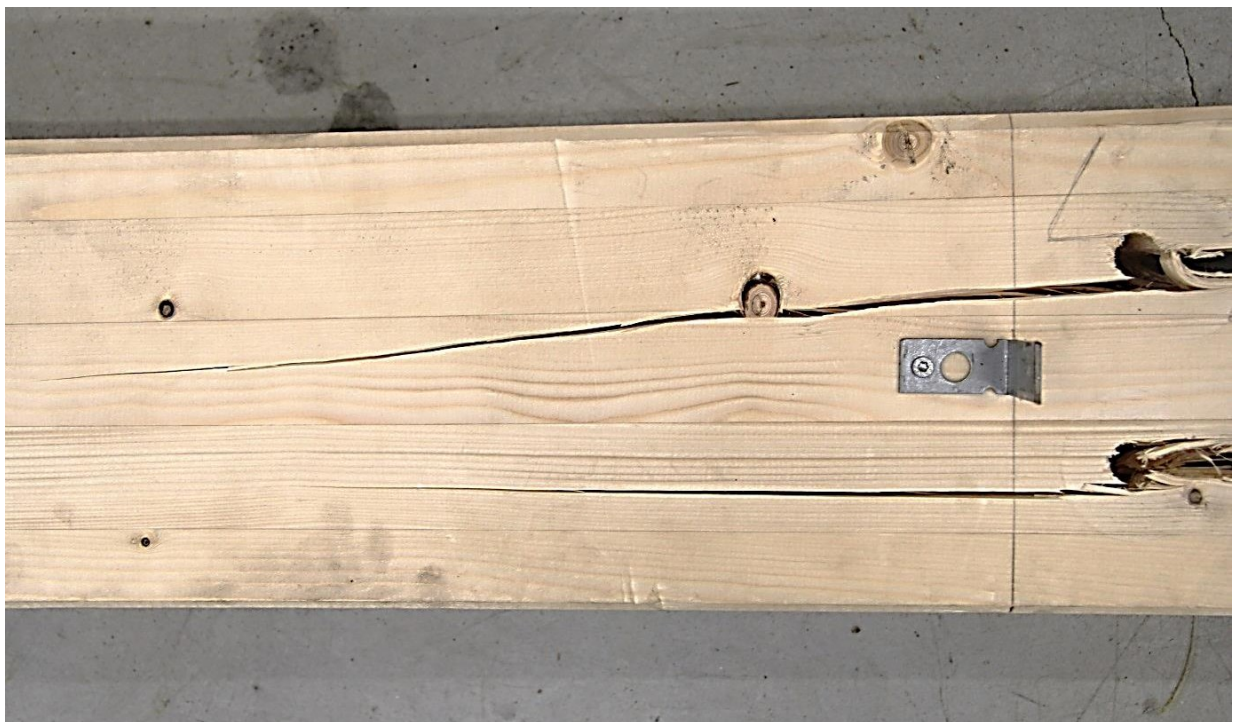
Po provedení experimentu bylo nutné popsat úroveň zdeformování použitých svorníků. Zdeformované svorníky významně otláčily dřevěný prvek i ocelový plech, což výrazně komplikovalo rozebrání konstrukce spoje a vyhodnocení jeho stavu po zkoušce. Po vyjmutí svorníků ze dřevěného prvku bylo jasně viditelné jejich předpokládané porušení. Došlo k ohybu spojovacích prostředků. Největší deformace se projevil u svorníků v horní části spoje. Zkouška potvrzuje teorii stanovení účinného počtu spojovacích prostředků n_{ef} , viz kapitola 3.5.

Podložky svorníků se díky natočení ocelových svorníků a vytvořením jejich plastických kloubů mírně zdeformovaly. Protažením svorníků od tahového namáhání ve směru jejich osy došlo k rozevření dřevěného prvku.

Z obr. 102 a obr. 103 jsou vidět trhliny sukovostí dřeva. Trhlina v místě soku nepokračuje, ale došlo k uvolnění soku a v tomto místě k oslabení dřevěného prvku.

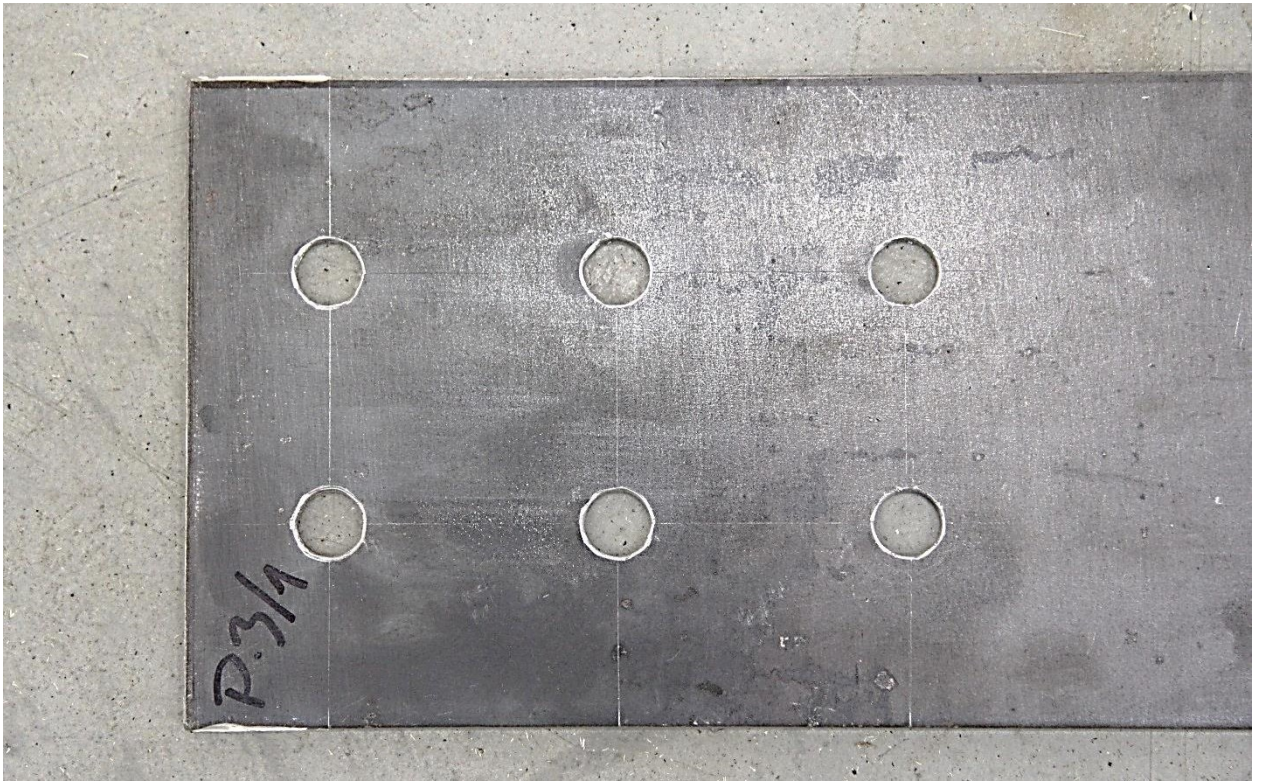


obr. 102 Detail deformací spoje s výraznými trhlinami vlivem posunu řady spojovacích prostředků

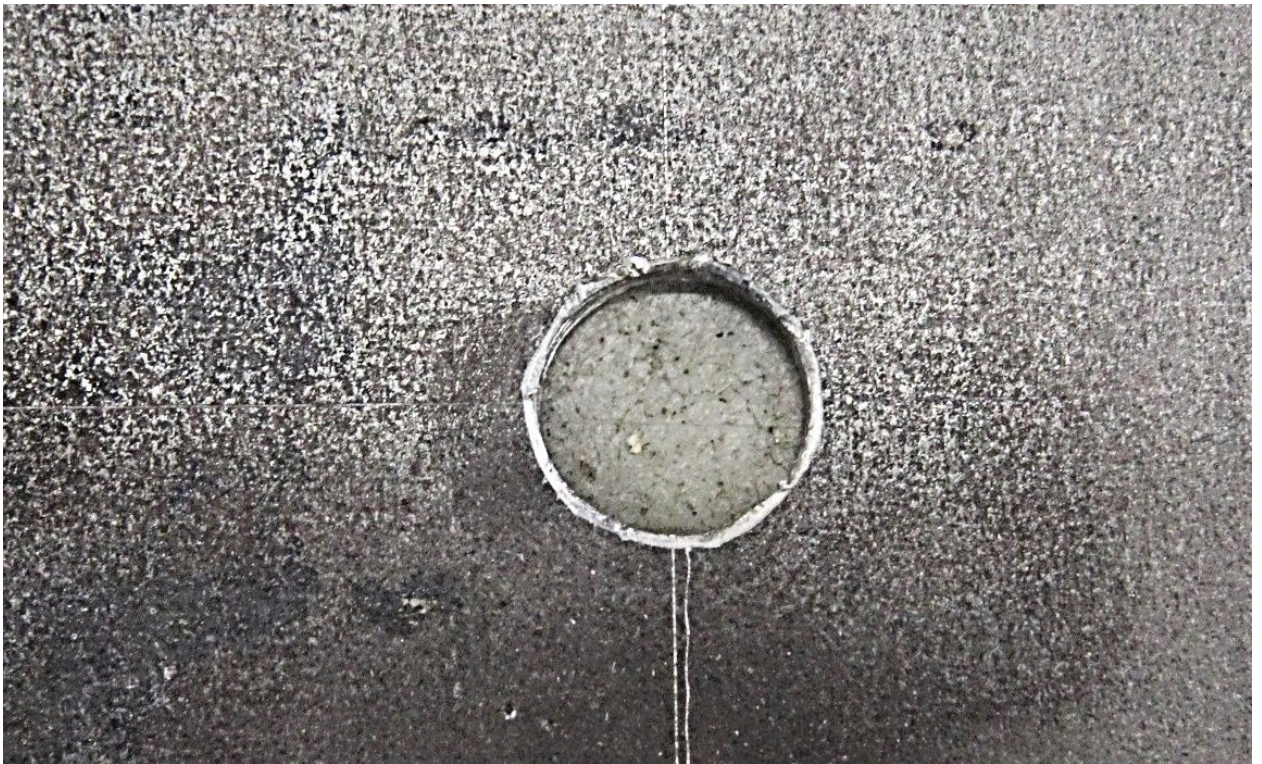


obr. 103 Vzniklé trhliny lemující přirozenou vadu ve formě soku

Ve všech vzorcích byl navržen plech tloušťky 6 mm. Došlo k otlacení plechu svorníky. Deformace je patrná z obr. 104 a obr. 105. Zdeformované otvory v ocelovém plechu mají po provedené zkoušce eliptický tvar.

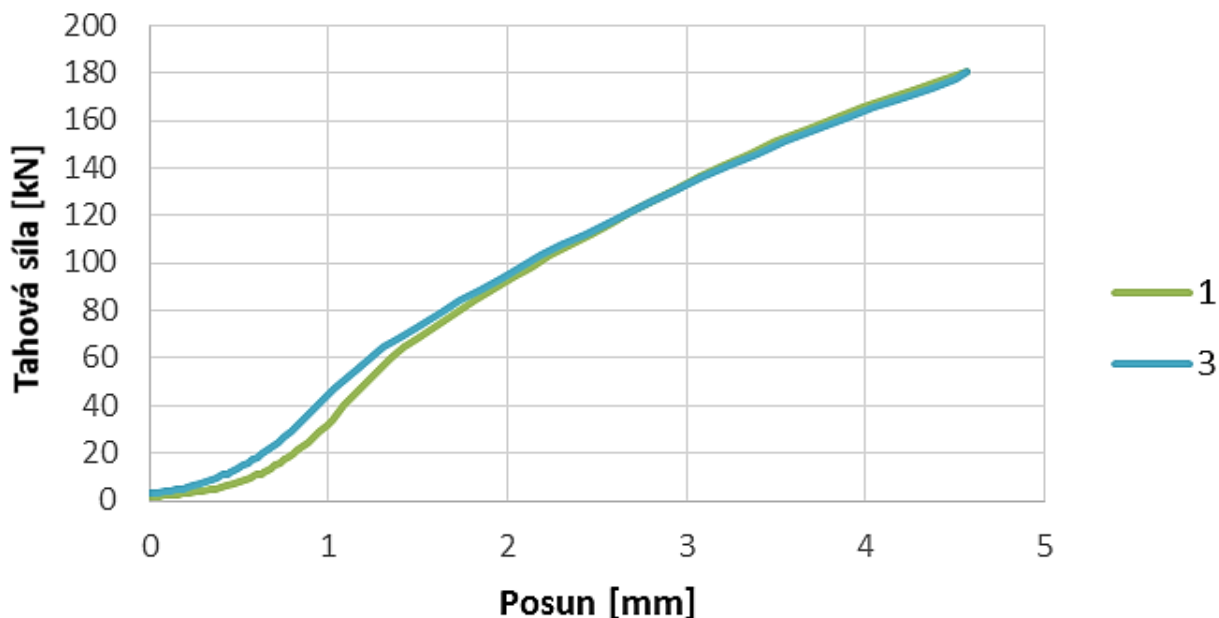


obr. 104 Deformace ocelového plechu v místě otvoru

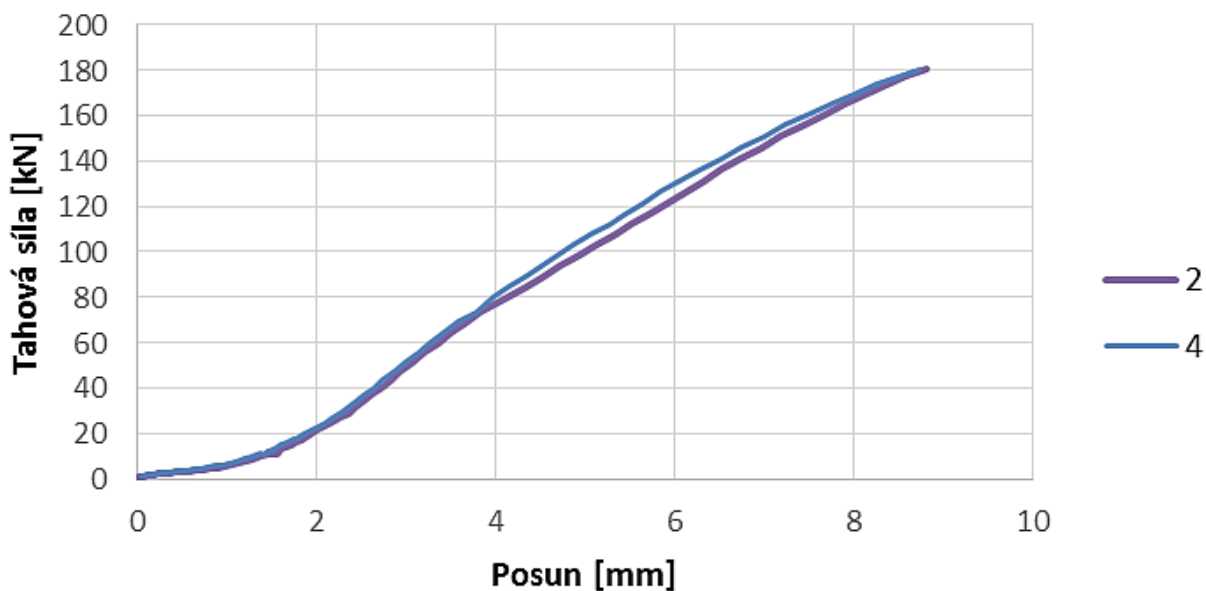


obr. 105 Detail otlacení otvoru ve směru působící síly

Průběh deformace během zatěžování je jasně patrný i z grafů posunů měřených bodů v závislosti na zatěžovací síle obr. 106 a obr. 107. Posuny bodů dosahují výrazně vyšších hodnot než stanovených z numerického modelování řešeného spoje. Výsledky z experimentu jsou i vzhledem k neočekávanému průběhu zatěžování vhodné k validaci numerického modelu po jeho úpravě vedoucí k uvažování plastických deformací dřevěného prvku.



obr. 106 Posun sledovaných bodů 1 a 3 z průběhu zatěžovací zkoušky

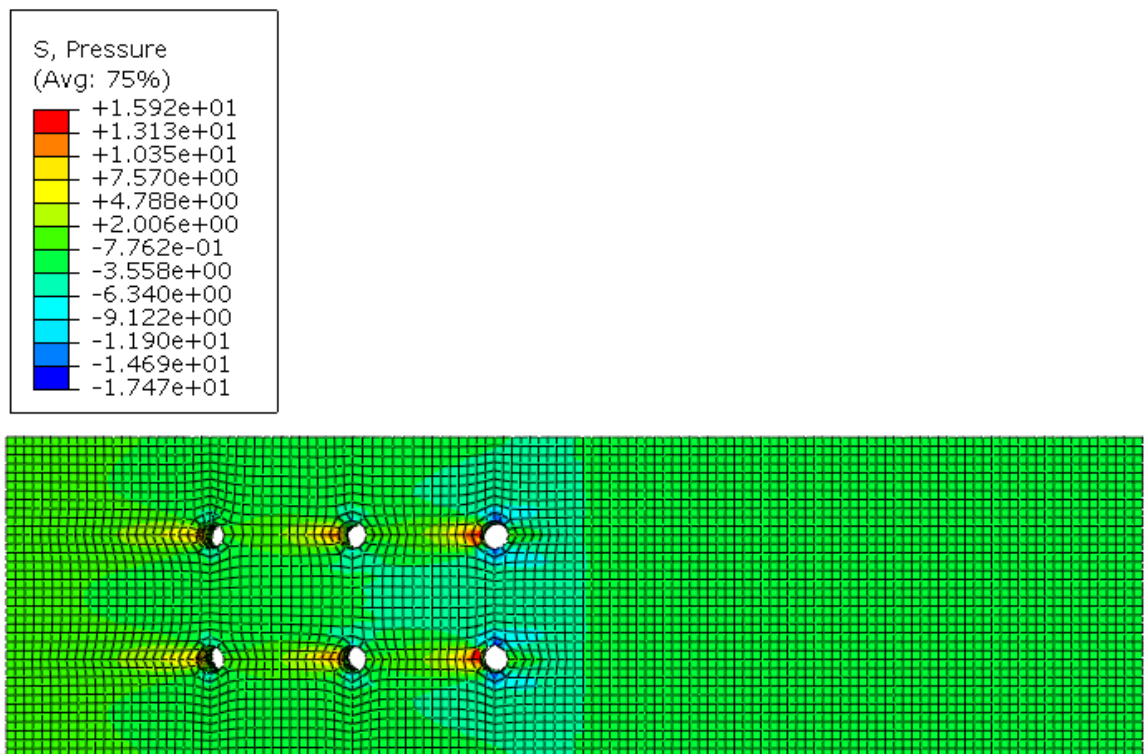


obr. 107 Posun sledovaných bodů 2 a 4 z průběhu zatěžovací zkoušky

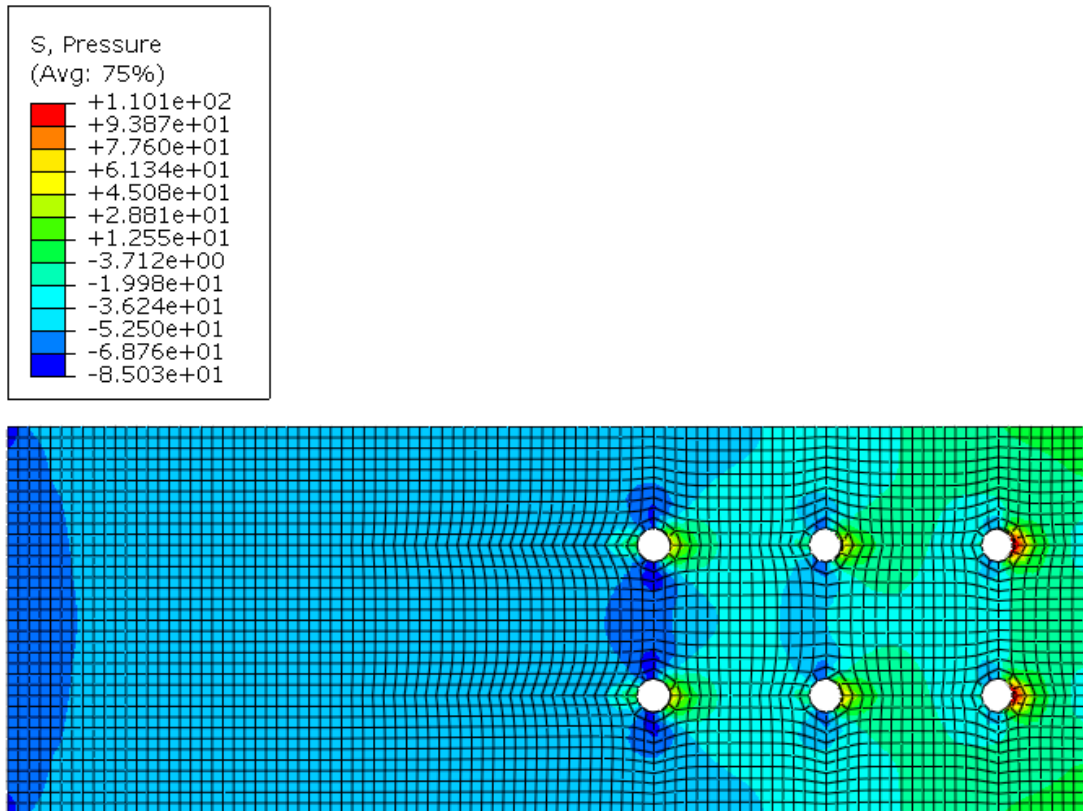
Validace numerického modelu

Po provedení zkoušek lze porovnat numerickou analýzu s výsledky zkoušky. Pro tahovou sílu do porušení spoje 180,2 kN jsou dále vykresleny hodnoty deformací z numerického modelu.

Hodnoty z numerického modelu přesně nepopisují chování reálného spoje při porušení. Bude třeba upravit materiálové vlastnosti. Z obr. 108 dřevěného prvku jsou patrná tahová namáhání překračující hodnotu předpokládaných maximálních tahových namáhání 14 MPa. Na obr. 109 je znázorněn průběh napětí v ocelovém plechu, který má podle předpokladů vyšší únosnost než dřevěný prvek.

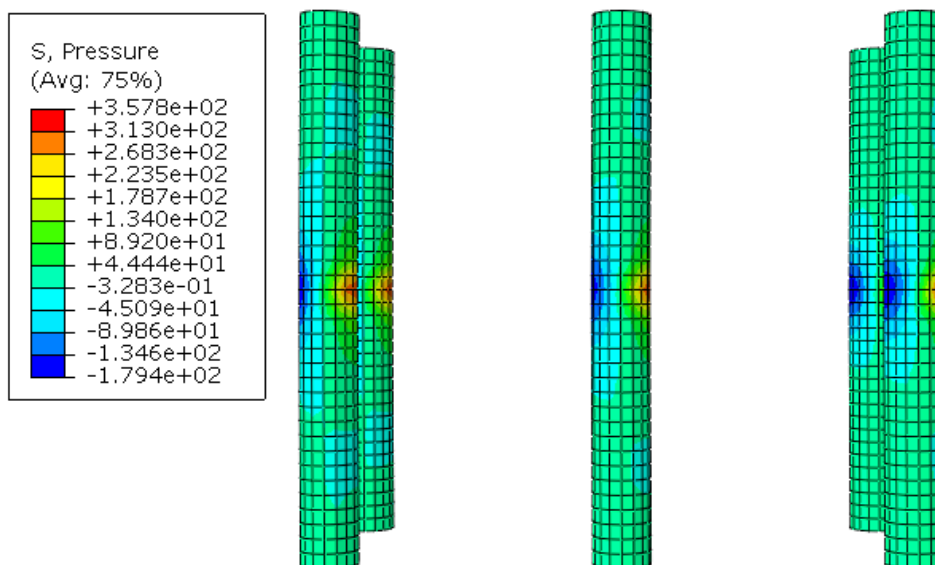


obr. 108 Hodnoty napětí [MPa] v dřevěném prvku spoje č. 3 při působení síly 180,2 kN



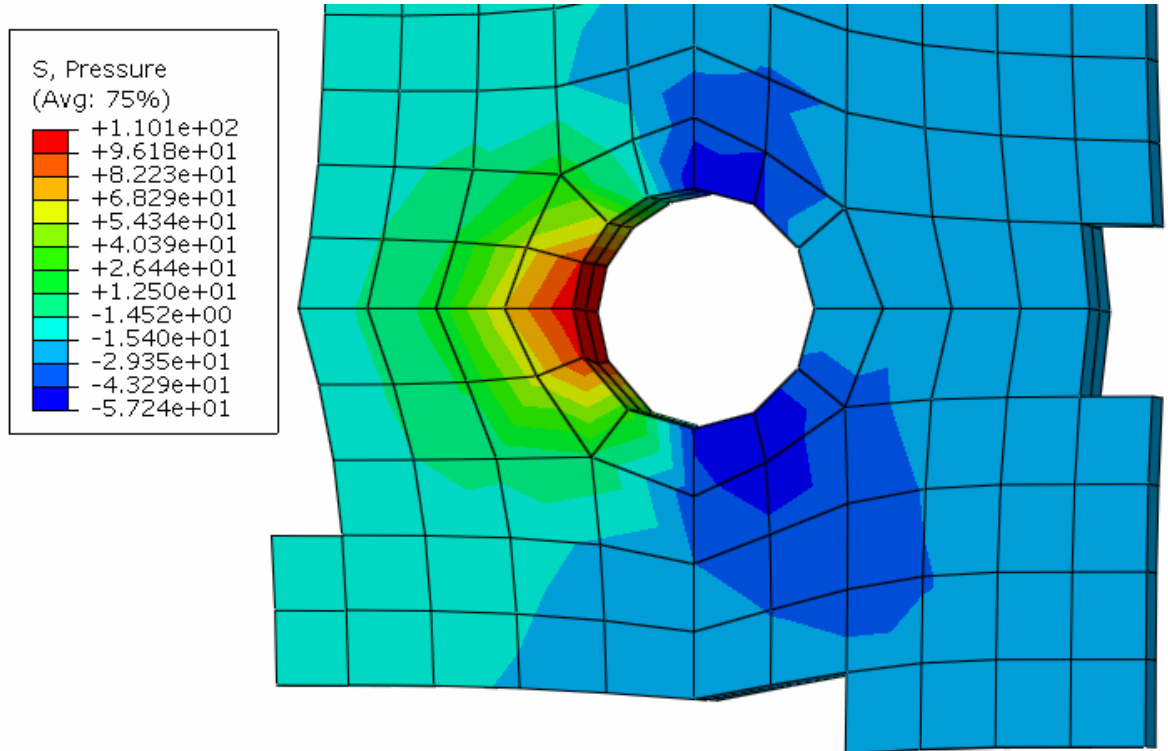
obr. 109 Hodnoty napětí [MPa] v ocelovém plechu spoje č. 3 při působení síly 180,2 kN

Na obr. 110 jsou vidět vyšší deformace svorníků nejvzdálenějších od působení síly. Způsob rozmístění napětí skupiny spojovacích prostředků uvažuje určení účinného počtu spojovacích prostředků.



obr. 110 Hodnoty napětí [MPa] v ocelových svornících spoje č. 3 při působení síly 180,2 kN

Na obr. 111 detailu ocelového plechu v místě otvoru pro vložení ocelového svorníku jsou viditelná působící tahová a tlaková napětí.



obr. 111 Hodnoty napětí [MPa] na detailu otvoru v ocelovém plechu vzorku č. 3 při působení síly 180,2 kN