



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

Návrh a optimalizace rámových rohů dřevěných hal

Design and optimization of frame corners of timber halls

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Karel Mikeš, Ph.D.

Bc. Martin Březina

Praha 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Březina Jméno: Martin Osobní číslo: 409740

Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh a optimalizace rámových rohů dřevěných hal

Název diplomové práce anglicky: Design and optimization of frame corners of timber halls

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rozbor a analýzu řešení dané problematiky. Pro zvolené konstrukční řešení vypracujte odpovídající analytický model se zohledněním nejdůležitějších faktorů a vlivů, které mají rozhodující podíl pro stanovení únosnosti a dalších parametrů konstrukčního řešení. Na základě těchto rozhodujících vlivů sestavte parametrický model na jehož základě může být dosaženo optimalizace jednotlivých vybraných parametrů spoje.

Seznam doporučené literatury:

Kuklík, P. Dřevěné konstrukce 10. Praha: Vydavatelství ČVUT

McKenzie, W.M.C. - Zhang B.: Design of Structural Timber To Eurocode 5, Red Globe Press

Porteous, J.: Structural Timber Design to Eurocode 5, Wiley-Blackwell; 2013

Jméno vedoucího diplomové práce:

Ing. Karel Mikeš, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.10.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Martin Březina

Název diplomové práce: Návrh a optimalizace rámových rohů dřevěných hal

Základní část: DŘEVĚNÉ KOKSTRUKCE podíl: 100 %

Formulace úkolů: ROZBOR A ANALÝZA ŘEŠ. PROBLEMATIKY; PRO ZVOL. KONSTR. ŘEŠENÍ VYPRACOVAT ODPOV. ANALYTICKÝ MODEL ZE ZOHLEDN. NEJDŮL. FAKTORŮ A VLIVŮ, KTERÉ MAJÍ ROZHOD. PODÍL NA ÚNOSKOSTI A DALŠÍCH PARAMETRECH. S VYUŽITÍM POPISU TECHTO VLIVŮ SESTAVIT PARAMETRICKÝ MODEL JEJŽ BUDE VYUŽIT TĚŽ PRO OPTIMALIZ.

Podpis vedoucího DP: _____

Datum: 1.10.2018

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Návrh a optimalizace rámových rohů dřevěných hal" vypracoval samostatně, za přispění odborných konzultací a veškeré informace jsem čerpal výhradně z citovaných pramenů.

V Praze dne 4. ledna 2019

Bc. Martin Březina

Poděkování

Poděkování patří především panu Ing. Karlu Mikešovi Ph.D. za vedení diplomové práce, ochotu a laskavost po celou dobu vypracování, a také za poskytnutí odborných materiálů a cenných rad. Dále bych rád poděkoval také Ing. Marku Rohovi za poskytnutí konzultací ohledně metody konečných prvků a vytváření 3D modelů.

Abstrakt

Obsahem této diplomové práce je především rozbor problematiky rámových konstrukcí se zaměřením na spoje v rámovém rohu. Na základě teoretických poznatků je provedena podrobná analýza u vybraných spojů a pomocí odpovídajících modelů jsou vyhodnoceny nejdůležitější parametry, které ovlivňují optimální návrh. Práce se dále zabývá rozbohem tuhosti rámových rohů a jejím vlivem na prokluz a redistribuci ohybového momentu. K vyhodnocení tohoto vlivu jsou vytvořeny parametrické modely vybraných rámových rohů a pomocí metody konečných prvků jsou vyjádřeny přesné deformace, čímž lze následně získat také hodnotu tuhosti spoje.

Ze získaných poznatků je následně provedena optimalizace stávající rámové konstrukce u vybraného objektu a jsou vyhodnoceny úspory konstrukčního řešení.

Klíčová slova

Rámový roh, rámové konstrukce, spojovací prvek, optimalizace, tuhost, únosnost.

Abstract

The content of this diploma thesis is mainly the analysis of frame constructions' problematic with focusing on connections of frame corner. Based on theoretical findings is made detailed analysis of chosen types of connection and with the aid of appropriate models are evaluated the most important parameters, which have influence on optimal design. This thesis is further deal with analysis of frame corners' rigidity and its influence on the slip modulus and redistribution of bending moment. To evaluate the influence are made parametric models of chosen frame corners and using the finite element method accurate deformations are expressed, thereby is possible to get a value of connections stiffness.

From the achieved findings is then made the optimization of current frame structure by the chosen building and are evaluated savings of structural design.

Key words

Frame corner, frame construction, connecting element, optimization, rigidity, bearing capacity.

OBSAH

1. Úvod	8
2. Rozbor a analýza rámových rohů dřevěných hal	9
2.1 Dřevěné rámové konstrukce a jejich vývoj	9
2.1.1 Vývoj rámových konstrukcí	9
2.1.2 Optimalizace dřevěných rámových soustav	11
2.1.3 Problematika dřevěných rámu	18
2.2 Typické spoje dřevěných rámových rohů	22
2.2.1 Šroubované spoje	22
2.2.2 Lepené spoje	26
2.2.3 Kombinované spoje	31
2.3 Analýza vybraných spojů	33
2.3.1 Kruhový šroubovaný styčník	33
2.3.2 Víceřadý kruhový šroubovaný styčník	39
2.3.3 Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou	41
2.3.4 Rozhodující vlivy vybraných spojů	47
3. Analytické modely vybraných spojů	47
3.1 Vybrané konstrukční řešení	47
3.1.1 Geometrie konstrukčního řešení	47
3.1.2 Zatížení	50
3.1.3 Vyhodnocení vnitřních sil	56
3.2 Analytické modely	60
3.2.1 Kruhový šroubovaný styčník	60
3.2.2 Víceřadý kruhový šroubovaný styčník	67
3.2.3 Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou	69

3.3 Vyhodnocení analýzy	80
3.3.1 Souhrn analyzovaných parametrů	81
3.2.2 Vyhodnocení vybraných spojů	82
4. Parametrické modely rámových rohů	83
4.1 Parametrické modely a jejich geometrie	83
4.1.1 Geometrie navržených modelů	84
4.1.2 Parametrické modely MKP	85
4.2 Vyhodnocení tuhosti spoje	91
4.2.1 Výpočet tuhosti	92
4.2.2 Vliv tuhosti na prokluz spoje	96
5. Optimalizace rámové konstrukce	100
5.1 Návrh a posouzení	100
5.1.1 Specifikace konstrukce	101
5.1.2 Statické posouzení	104
5.2 Vyhodnocení optimalizace	115
6. Závěr	117
7. Seznam příloh	119
8. Seznam použitých zdrojů	120
8.1 Literatura	120
8.2 Internetové zdroje	123

1. Úvod

Halové konstrukce jsou díky svému konstrukčnímu řešení velmi žádané a mají zásadní význam ve stavebnictví. Jejich hlavní prioritou je převážně zastřešení velkého rozpětí bez narušení dispozice, čímž jsou vhodné například pro výrobní průmysl, rekreační a volnočasová zařízení, nebo také pro zemědělské stavby. Jako hlavní konstrukční materiál se nejčastěji používá ocel, která je však nevýhodná svou velkou hmotností a také dobou požární odolnosti. Mimo jiné jsou při výstavbě hal často zásadní také estetické požadavky a je kladen důraz na použití přírodních materiálů, což je typické například pro sportovní haly.

Z těchto důvodů se stále častěji používají také dřevěné konstrukce, které jsou ve většině případů tvořeny rámovým systémem. V praxi však u tohoto řešení neřídka dochází k předimenzování, a tím i k neúspěšnému a neekonomickému návrhu stavby. Pro funkčnost rámových konstrukcí je obecně nejdůležitějším bodem rámový roh, který musí přenést veškeré působící vnitřní síly do základu, což je u dřevěných rámu hlavním úskalím. Návrh celé rámové konstrukce a dimenze jednotlivých prvků závisí převážně na tuhosti spoje v rámovém rohu a díky optimalizaci tohoto prvku může být dosaženo výrazných úspor při výstavbě.

Vývoj stavebnictví bude v následujících letech úzce spojený s optimalizací návrhu. Z tohoto důvodu mě tato problematika velmi zaujala a vybral jsem si ji jako téma diplomové práce k podrobnějšímu rozboru.

Cílem práce je návrh a optimalizace rámového rohu u stávající dřevěné sportovní haly v Sušici včetně komplexního rozboru této problematiky. Obsah bude dále podrobněji zaměřen na vývoj dřevěných rámových konstrukcí, analýzu typických rohových spojů pomocí odpovídajících analytických modelů a následné vyhodnocení hlavních parametrů, které ovlivňují návrh rámového rohu.

V další části práce budou vytvořeny parametrické modely vybraných spojů, které budou geometricky modifikovány a následně dojde k vyhodnocení jejich tuhosti. Výsledkem bude dosažení materiálově úsporné varianty s optimálním využitím únosnosti, která se následně porovná se stávajícím řešením sportovní haly v Sušici.

2. Rozbor a analýza rámových rohů dřevěných hal

2.1 Dřevěné rámové konstrukce a jejich vývoj

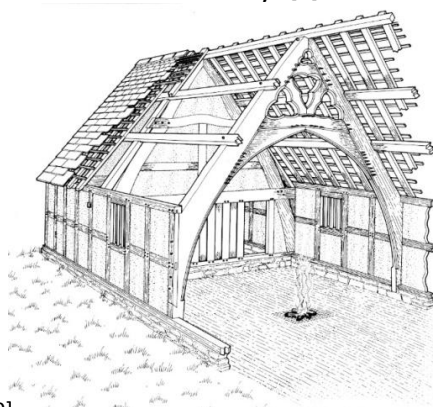
Rámové konstrukce jako takové jsou v dnešní době neodmyslitelně spjaté s halovými stavbami a v celé historii byl jejich vývoj ovlivněn převážně potřebou zastřešení velkého prostoru. Pro tyto účely je právě rám jedním z neefektivnějších řešení, ale jako každá jiná konstrukční soustava má také určité nevýhody a kritická místa. Tím hlavním je u rámových konstrukcí právě rámový roh a s tím související provedení pro přenos působících vnitřních sil.

V minulosti byl tento konstrukční spoj limitujícím faktorem a maximální využití rámového systému tedy nebylo možné. Z tohoto důvodu vznikaly pouze stavby na menší rozpětí a až s vývojem dokonalejších spojů došlo k určitému rozmachu.

2.1.1 Vývoj rámových konstrukcí

K zastřešení prostor o větším rozponu se v celé historii používaly různé nedokonalé systémy už ve starověkém Egyptě a Řecku. První propracovanější řešení bylo vyvinuto až od římských stavitelů a jednalo se o předchůdce věšadlového krovu, který nebyl nijak překonán pro dlouhá staletí. [8]

Až v době středověké Anglie se objevují první náznaky skutečné rámové konstrukce, která byla nutná pro vytvoření domovní haly v rámci výstavby hrázděných domů. Toto dispoziční řešení bylo typické především ve Walesu a střední Anglii a rámový systém byl u těchto staveb velmi rozšířený. [9]

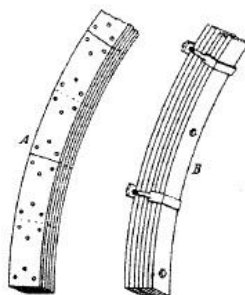


Obr. 1 - Historický rám ve Walesu [9]

Jednalo se o trojkloubové provedení, kde příčle tvořily nosnou střešní konstrukci a byly navrženy pod velmi výrazným sklonem. Stojky rámu pak působily

zároveň jako stěnové sloupky a jejich průřez postupně ustupoval s větší vzdáleností od rámového rohu. Jednalo se o rostlé dřevo, které nemělo výraznou únosnost, ale zatížení těchto domů také nebylo nijak zásadní. Díky tomu byla tato konstrukce ve své době velmi funkční a pokroková. [9]

Poté však nebyl u těchto konstrukčních systémů po dlouhou dobu zaznamenán žádný výrazný rozvoj a posun nastal až začátkem 19. století, kdy započala strojní výroba řeziva, což umožňovalo realizaci plnostěnných a příhradových rámu. Jednalo se převážně o příhradové obloukové nosníky, u kterých byly aplikovány spoje pomocí kolíků a svorníků. Mezi nejznámější systémy patří například de l'Ormeho soustava, u níž jsou vytvořeny krátké obloukové segmenty tak, že dojde ke složení několika prken seříznutých do oblouku a jejich vzájemnému spojení pomocí svorníků nebo kolíků. Důležité je prostřídání prken, aby bylo možné jednotlivé segmenty účinně napojit na sebe. Dalším známým systémem je Emyho soustava, která je prvním předchůdcem lepeného lamelového dřeva a dnešních nejpoužívanějších systémů pro rámové konstrukce. V tomto případě se jedná o soustavu několika prken o odlišných tloušťkách, které jsou ohýbány na plocho a následně spojeny ocelovými objímkami po vzdálenostech 1 až 1,5 m. Tímto byla umožněna rychlá a efektivní výroba oblouků pro zastřešení velkých rozponů. Z těchto základních systémů byly následně vytvořeny další rozvinutější soustavy a vývoj šel výrazně kupředu. [8] [1]



Obr. 2 - De l'Ormeho (vlevo) a Emyho soustava (vpravo) [8]

Zásadním průlomem pro rámové prvky byl vývoj technologie lepeného lamelového dřeva, který započal v průběhu druhé světové války pro výrobu koster transportních lodí. [8] Využití bylo následně přeneseno i do stavebnictví a již v roce 1952 začala výroba tohoto kompozitního materiálu v České republice. Tímto byla umožněna modifikace různých tvarových řešení a optimální únosnosti pro větší

rozpětí. [II] [I] S touto novou technologií se však začaly objevovat i určité nedostatky a bylo velmi zásadní vyřešit odpovídajícím způsobem provázání jednotlivých segmentů kompozitu a k tomuto účelu byla navržena metoda cinkování. [II] Dalším kritickým místem bylo provedení konstrukčních spojů a jejich dostatečná tuhost.

Z tohoto důvodu byly v počátcích navrhovány hlavně obloukové systémy, kde nebylo tolik kritických bodů jako u dnešních klasických ráků. Díky postupnému zdokonalování rámových styčků a zkvalitnění výroby kompozitních materiálů však došlo k optimalizaci konstrukčních řešení a výraznějšímu využití rámových soustav. [III]



Obr. 3 - Obloukový rámový roh [I]

V současné době jsou tedy dřevěné rámy jedním z nejpoužívanějších systémů zastřešení halových objektů v oblasti rekreačního využití, zemědělství nebo výroby. Výraznější zájem je více citelný v tradičních dřevozpracujících zemích jako je Německo, Rakousko nebo Finsko, které mají stále více rozvinutou výstavbu dřevěných konstrukcí. V ČR je však o tyto konstrukce stále větší zájem a jejich využití bude v budoucnu narůstat.

2.1.2 Optimalizace dřevěných rámových soustav

V dnešní době se standardně používá několik hlavních typů rámových soustav, které jsou již ověřené a v minulosti se jejich použití osvědčilo. Obecně je však nutné posouvat vývoj stavebnictví stále kupředu a zabývat se především hospodárností konstrukcí. Z tohoto důvodu je vhodné před výběrem použitého typu rámu nejprve vyhodnotit všechny důležité konstrukční parametry a návrh maximálně optimalizovat.

Základním parametrem pro volbu optimálního konstrukčního řešení je v první řadě statický systém, který určuje průběh vnitřních sil a celkové namáhání dílčích prvků konstrukce. Na základě vhodně zvoleného systému jsou poté zjištěny hodnoty

působících sil na konstrukci a mohou být optimalizovány jednotlivé konstrukční části. U rámových soustav se jedná především o geometrii stojky, příčle a rámového rohu. V případě trojkloubového rámu je dalším zásadním prvkem spoj ve vrcholové části. [3]

V poslední řadě mohou být optimálně navrženy materiálové parametry tak, aby byla splněna patřičná únosnost, a aby zároveň došlo k maximálnímu využití konstrukce při přenosu vnitřních sil do základů. Parametry pro optimální návrh konstrukce jsou rozděleny následovně:

a) Statický systém

Pro účely zastřešení velkých rozpětí jsou obecně používány 3 hlavní typy statických systémů. Zásadní rozdíl představuje rozmístění kloubů po konstrukci, což ovlivňuje stupeň statické neurčitosti, a tím i citlivost na účinky od silového i nesilového zatížení. Nejběžnější typy statických systémů jsou dvoukloubový a trojkloubový rám a alternativou pro zastřešení je také často kombinace vetknutých sloupů a kloubově uloženého vazníku. Toto řešení však nelze považovat za klasický rám a je zde uvedeno pouze pro srovnání. [10] [8]

1. Dvoukloubový rám

Jedná se o velmi používané statické řešení, kde je rám navržen jako jeden celistvý prvek, který je pouze kloubově uložený v patě k základům. U tohoto systému je nejvíce namáhaná příčle v polovině rozpětí a následně také rámový roh, který musí přenést velmi výrazný ohybový moment. Standardní rozpon dvoukloubových rámu je 10 až 30 m, což je nutné zohlednit při návrhu spojů kvůli problematické přepravě. [3] Díky kloubovému uložení rámu jeví konstrukce menší citlivost na deformace jako je například sedání podpory, které vzniká v důsledku sedání stavby. [10]

2. Trojkloubový rám

Tento statický systém je pravděpodobně nejvíce aplikovaný a jeho hlavní výhodou je vložený kloub do poloviny příčle, čímž vzniká v tomto místě nulový ohybový moment a dochází k výrazné redukci dimenze konstrukčních prvků. Další předností je také snadné rozložení celé konstrukce a tím i jednodušší montáž a přeprava. [4] Trojkloubové rámy se běžně používají na rozpon 15 až 40 m a vlivem přidání kloubu do příčle je tento systém v porovnání s předchozí variantou ještě méně náchylný na vnější deformace. [10] Avšak stejně jako u dvoukloubových rámu je kladen velký důraz na

rámový roh, kde v tomto systému vzniká právě zde nejvýraznější ohybový moment.



Obr. 4 - Dvoukloubový rám (vlevo) a trojkloubový rám (vpravo) [1]

3. Vetknuté sloupy s kloubovou příčlí

Pro srovnání je zde uveden i tento statický systém, který je také velmi často používaný pro překlenutí velkých vzdáleností, ale neřadí se mezi rámy. Jedná se o soustavu dvou vetknutých sloupů, na které je pomocí kloubů uchycena příčel v podobě různých typů vazníků. Problémem tohoto systému je především nulový moment v rohovém přechodu příčle a sloupu, čímž dochází k výraznému nárůstu hodnot momentového zatížení uprostřed vazníku. Z tohoto důvodu je nutné použít mnohem větší dimenzi konstrukčních prvků a vznikají opět komplikace s montáží a přepravou.

Následující schéma znázorňuje průběhy momentů u jednotlivých statických systémů:



Obr. 5 - Průběh ohybového momentu (zleva): vetk. sloupy s kl. příčlí, dvoukloubov. rám, trojkloubov. rám

Z průběhu ohybových momentů je patrné, že použití kloubově uloženého vazníku není kvůli vysoké hodnotě působícího momentu uprostřed příčle nejvhodnější a jako optimální varianta se jeví statický systém s dvoukloubovým rámem. V případě trojkloubového rámu je zase evidentní příliš vysoký moment v místě rámového rohu.

b) Konstrukční prvky

Z hlediska optimálního návrhu konstrukce je nutné na základě zvoleného statického systému použít takové konstrukční prvky, aby byly maximálně využity vzhledem k působícím vnitřním silám. U rámcových konstrukcí lze systém rozdělit na příčel, stojku a rámový roh. Každý z těchto komponentů je možné optimalizovat.

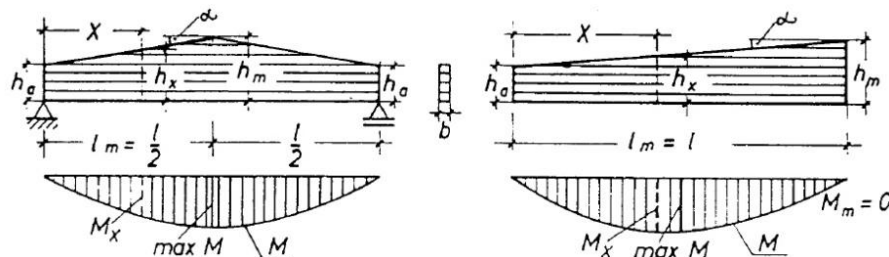
1. Příčel

Obecně je při návrhu příčle kladen důraz na maximální využití průřezových

charakteristik v každém bodě po délce prvku. Z tohoto důvodu se často používají nosníky s proměnnou výškou průřezu, což zároveň může sloužit i k vytvoření spádu střešní konstrukce. Z pravidla se při návrhu nejvíce uplatňují následující prvky: [1] [4] [3]

- Plnostěnný nosník s konst. průřezem (příp. obloukový)
- Pultový nosník
- Sedlový nosník

Konstantní průřez je často používanou variantou, jedná se však o neúsporné řešení. Je tedy vhodnější použití sedlového nosníku v případě dvoukloubového statického systému, kde je nejvyšší průřez uprostřed pole a působí tak v místě maximálního ohybového momentu. Zároveň je však nutné ověřit kritický průřez, který je specifickým problémem sedlových vazníků. [8] U trojkloubových systému je optimální využití pultového nosníku, který je umístěn tak, aby byl nejnižší průřez právě ve vrcholové části, kde působí nulový ohybový moment. [4] [8]



Obr. 6 - Sedlový nosník (vlevo) a pultový nosník (vpravo) [8]

2. Stojka

Tato část konstrukce je ve většině případů tvořena konstantním průřezem nebo případně také náběhem, který odpovídá pultovému nosníku. Toto provedení má však výrazný vliv na snížení únosnosti, která je zároveň ovlivněna možnou ztrátou stability vlivem tlakového působení. U stojky je nutné posoudit také vzájemnou interakci tlaku a ohybu. [11]

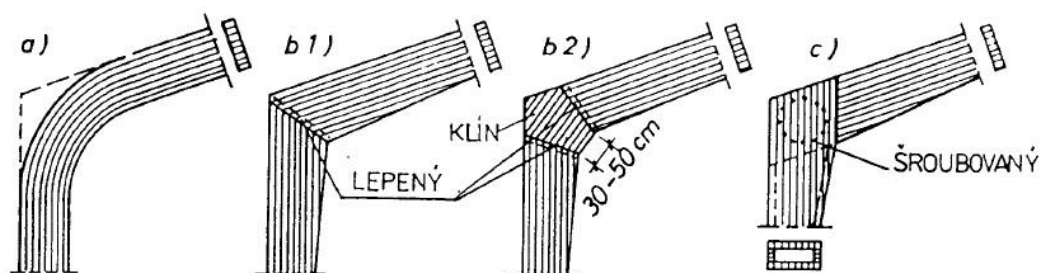
3. Rámový roh

Rozhodujícím prvkem rámových konstrukcí je právě navržený spoj v místě rámového rohu, který musí maximálně přenést veškeré působící vnitřní síly z příčle do stojky. Kritériem pro splnění tohoto požadavku je především dostatečná tuhost a také únosnost. Ve většině případů se používají mechanické spoje pomocí ocelových kolíků a svorníků, ale v posledních letech jsou velmi obvyklé také spoje chemické. Jedná se o

spojení příčle a stojky pomocí velmi kvalitních lepidel. K tomuto provedení se také často využívá zubovitý spoj, který je vytvořen na kontaktu lepených konstrukčních prvků. [7] [12] V případě mechanických spojů je zásadní hlavně pevnost v otlacení, která závisí na kvalitě navržených dřevěných konstrukčních částí a jejich hustotě. Dále hraje roli charakteristická pevnost ocelových spojovacích prvků a jejich zvolený průměr. U tohoto parametru však ne vždy platí přímá úměra a s větším průměrem nemusí být vyvozena vyšší únosnost. [11]

Jedním z klasických typů rámového rohu je také plynulý oblouk z lepeného lamelového dřeva s rozšířeným průřezem, který je však velmi náročný na výrobu a v dnešní době se příliš často nepoužívá. [3] [13] Dalším méně používaným typem je rám se stojkami ve tvaru V, který takto vytváří rohový spoj pro umožnění přenosu vnitřních sil. [13] [8] Naopak se v posledních letech více rozšiřuje provedení s vlepenými závitovými tyčemi a tato varianta je stále zkoumána a optimalizována. Obecně jsou nejvíce používané následující typy rohových styčnicků: [14] [13] [8]

- Kolíkový kruhový spoj
- Lepený zubovitý spoj
- Dvojitý lepený zubovitý spoj
- Plynulý obloukový spoj
- S vlepenými závitovými tyčemi
- Stojka ve tvaru V



Obr. 7 - a) Plynulý obloukový spoj, b1) Lepený zubovitý spoj, b2) Dvojitý lepený zubovitý spoj, c) Kolíkový kruhový spoj [8]

Na základě shrnutých parametrů je možné navrhnout každý konstrukční prvek optimálním způsobem a následně vyhodnotit typ použité rámové soustavy. Je důležité zohlednit také náročnost na výrobu, způsob montáže a dopravu na stavenišť. V případě dopravy je limitujícím faktorem převážně délka a tvar konstrukčního prvku. Pro

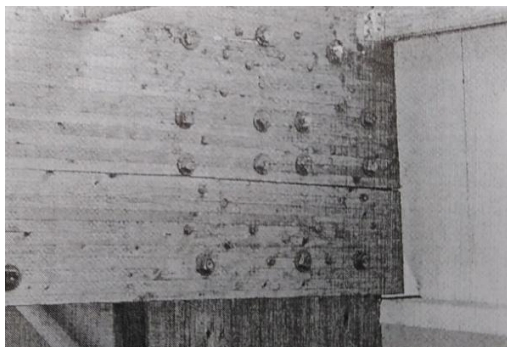
tyto účely je možné využít řadu dopravních prostředků, avšak nesmí být překročena maximální šířka nákladu 2,5 m, výška 4 m a délka okolo 10 m. Při překročení se jedná o nadměrný náklad, který musí být převážen speciální soupravou a je nutné vybrat také vhodnou trasu kudy vozidlo bez komplikací projede až na určené stavenišťě. [13]

c) Materiálové provedení

Po optimalizaci statického systému a konstrukčních prvků zůstává pouze zvážení vhodného materiálového provedení tak, aby byly dodrženy veškeré požadavky mezního stavu použitelnosti a zároveň nedošlo ke vzniku trhlin v některých kritických částech konstrukce vlivem sesychání. Vlhkost dřeva v tomto případě hraje velmi zásadní roli a správným návrhem materiálových charakteristik může být zabráněno případným budoucím poruchám konstrukce. Obecně je důležité při návrhu zohlednit následující charakteristiky: [13] [11]

- Třída provozu konstrukce
- Modifikační součinitel pevnosti k_{mod}
- Součinitel dotvarování k_{def}
- Třída pevnosti dřeva

Díky správnému určení třídy provozu konstrukce je možné omezit objemové změny dřevěných konstrukčních prvků a určit tak jejich jmenovitý rozměr, který je rozhodující při statickém působení. Mimo jiné bude tímto omezeno rychlé sesychání a nedojde tak k vytvoření trhlin v místech spojů, kde je jinak volnému sesychání bráněno.



Obr. 8 - Trhliny v rámovém rohu vlivem sesychání [13]

Modifikační součinitel pevnosti k_{mod} je koeficient snižující návrhovou únosnost a určuje se na základě použitého materiálu, již zmíněné třídy provozu a třídy trvání zatížení. Při nepříznivých vlhkostních podmínkách, což odpovídá třídě provozu 3,

může být únosnost v porovnání s normálními podmínkami snížena až o 20%. Při návrhu je tedy nutné tyto podmínky důkladně prověřit a případně počítat s určitou rezervou. [15] [11] Procentuální vlhkost by měla být dále také stanovena pro výrobu materiálu, kterým je ve většině případů kompozit jako lepené lamelové dřevo nebo v některých případech i dřevo vrstvené. [IV] [III]

Dalším vlivem souvisejícím s návrhem optimálního materiálu je dotvarování, které je u dřevěných konstrukcí zcela zásadní a má vliv na životnost konstrukce. Tento proces je vyjádřený součinitelem dotvarování k_{def} , který je určen na základě zvoleného typu materiálu a třídy provozu. Dotvarování konstrukčních prvků ovlivňuje především deformaci a také tuhost celé soustavy na konci navrhované životnosti. [11] [16] I v tomto případě je rozhodujícím kritériem vlhkost dřeva.

Materiálová optimalizace souvisí však především s výběrem vhodného řeziva, která má odpovídající pevnostní třídu u všech posouzení únosnosti. Pro rámové konstrukce je ve většině případů používán lepené lamelové dřevo, od třídy pevnosti GL24h nahoru, dle působících napětí. Výroba tohoto materiálu podléhá přísným kontrolním podmínkám jakosti, kterými jsou vizuální a strojní třídění, stanovené podle platných norem. Hlavním vlivem na snížení únosnosti je převážně výskyt suků a vad v surovém dřevě. Pro lepené lamelové dřevo je používáno jen kvalitní řezivo a lepení je prováděno až po umělém vysušení, které připouští maximální vlhkost 15 %. [13] [3]

Alternativou je vrstvené dřevo LVL, které je stejně jako předchozí uvedený materiál také kompozitní. Jedná se o vzájemně slepené dřevěné dýhy orientované v jednom směru, které obvykle pochází z velmi kvalitních dřevin. V porovnání s lepeným lamelovým dřevem je však tento materiál tvořen výrazně tenčími lamelami a výroba nosníku o stejné třídě pevnosti je tedy podstatně náročnější a dražší. Z tohoto důvodu se LVL pro rámové konstrukce příliš nepoužívá a své využití našlo především na skandinávském poloostrově. [13] [IV]

Všechny zmíněné materiálové charakteristiky by měli být v rámci návrhu zohledněny a optimalizovány tak, aby byl materiál dostatečně využitý, ale zároveň je nutné zachovat jistou rezervu z důvodu vysoké náchylnosti dřeva na měnící se vlhkostní poměry a tím způsobené sesychání.

Na základě podrobného rozboru uvedených částí je možné vyhodnotit zcela optimální provedení rámové soustavy a navrhnout tak co nejvíce úspornou konstrukci, která však bude vyhovující všem požadavkům.

2.1.3 Problematika dřevěných rámu

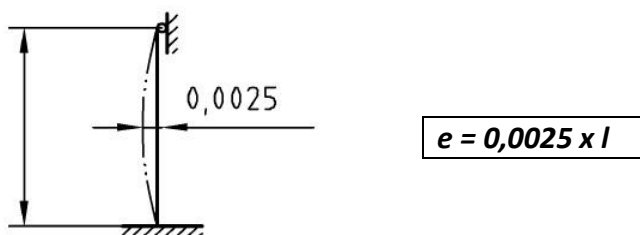
Stejně tak jako jiné konstrukční systémy mají i dřevěné rámové soustavy typická kritická místa, která je nutné při návrhu zohlednit a podrobněji se jimi zabývat. Výběr vhodné statické varianty, jako například dvoukloubového rámu, není pro přiblížení reálnému chování konstrukce dostatečný a není zde vůbec zohledněn vliv tuhosti spoje v rámovém rohu nebo imperfekcí soustavy. [18] [17] Při optimalizaci návrhu je kladen důraz na co největší využití únosnosti konstrukce a tato působení není možné zanedbat. Mezi nejdůležitější patří následující vlivy:

a) Rámové imperfekce

Pro výpočet působících vnitřních sil se obecně používá vyjádření pomocí lineární teorie I. řádu, která počítá s dokonalým provedením konstrukce. V reálném případě však dochází k mnoha odchylkám které se označují jako imperfekce. Jedná se například o odchylku mezi ideální výpočtovou osou a těžištěm průřezu nebo o materiálové nestejnorodosti. [18] Je tedy nutné tyto vlivy zohlednit a provést výpočet nelineární podle teorie II. řádu, který se pro zjednodušení nahrazuje pomocí počátečních okrajových podmínek. Pro upřesnění se zohledňují imperfekce geometrické, které zahrnují nelinearity dílčích prutů a imperfekce konstrukční, v nichž jsou obsaženy nelinearity konstrukční soustavy jako celku. [18] [17]

1. Geometrické imperfekce

Jedná se o vliv materiálových nelinearit, který je zohledněn u všech dílčích konstrukčních prvků a stanovuje se obecně pomocí zakřivení prutu s maximální výchylkou e v polovině délky. Výpočet výchylky je určen následujícím vztahem: [17]



Obr. 9 - Geometrické imperfekce [17]

Hodnota l vyjadřuje délku dílčího prutu nebo případně vzdálenost jeho okrajových uzlů. [17] Určená zakřivení jednotlivých prutů se v rámci statického výpočtu nebo výpočetního modelu zavádí pomocí náhradního silového zatížení, které vyvoluje deformační účinky odpovídající určeným excentricitám. [19]

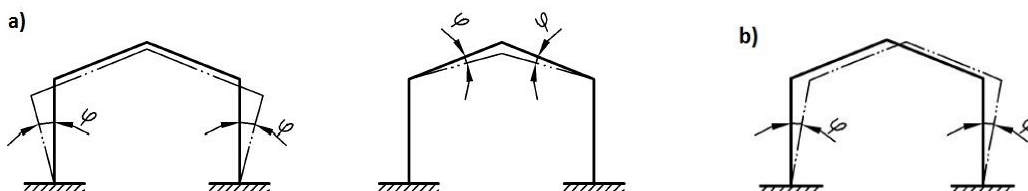
2. Konstrukční imperfekce

Kvůli možným osovým odchylkám působících sil od těžiště průřezu může docházet k pootočení jednotlivých konstrukčních prvků a tento vliv se nahrazuje pomocí imperfektního tvaru s úhlem zkosení φ , jehož hodnota je vyjádřena následujícím vztahem podle délky prutu: [18] [17]

$\varphi = 0,005$	$(\text{pro } l \leq 5 \text{ m})$
$\varphi = 0,005 \times \sqrt{5/l}$	$(\text{pro } l > 5 \text{ m})$

Za hodnotu l se dosazuje výška nosné konstrukce nebo obecně délka dílčího prutu. Dále je nutné rozlišovat geometrii působícího zatížení, které je v případě rámu symetrické nebo nesymetrické.

U symetrického působení je výchylka stojek rámu v opačném směru a dochází také ke zkosení rámové příčle. U halových staveb je však obvyklé zatížení nesymetrické a rámová konstrukce je tedy pouze nakloněna jako celek o úhel φ . Bližší specifikace je uvedena na následujícím schématu. [17] [18]



Obr. 10 - Konstrukční imperfekce: a) Symetrické zatížení, b) Nesymetrické zatížení [17]

Určené deformace zohledňující konstrukční imperfekce se do statického výpočtu nebo výpočetního modelu zavádějí pomocí náhradních osamělých sil, které vyvolují tyto účinky. [19]

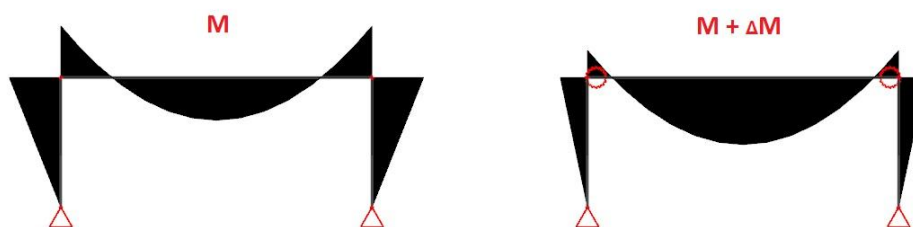
Obecně je možné vliv nelineárních účinků II. řádu řešit několika možnými způsoby podle globální analýzy konstrukcí. V principu je pro posouzení mezních stavů nutné tyto účinky zohlednit a je možné je buď zahrnout na stranu vypočítaných vnitřních sil nebo provést redukcí únosnosti vlivem tohoto působení. Nejobvyklejším

způsobem je právě redukce únosnosti, při čemž jsou do výpočtu zahrnuty součinitele zohledňující vliv ztráty stability, kritické délky prutů a soustava je řešena jako lineární pomocí teorie I. řádu. Tento způsob bude použit i v rámci diplomové práce. [19] [4]

b) Tuhost spoje v rámovém rohu

Nejvíce specifickou problematikou rámových konstrukcí a zároveň jejich nejnáchylnějším místem je spoj v rámovém rohu. Pro správnou funkčnost a plné přenesení působících vnitřních sil, především ohybových momentů, by měl být tento spoj dokonale tuhý. To však není reálné a naopak je to u dřevěných konstrukcí velmi kritické místo. Nejedná se o kontinuální provedení jako je tomu u betonových nebo ocelových rámu, kde lze tuhosti v rámovém rohu snadno dosáhnout. [15]

V případě rámu dřevěných je ve většině tuhost přenesena na ocelové spojovací prvky, u kterých dochází k výraznému prokluzu spoje. [3] [15] Vlivem této poddajnosti nastává redistribuce ohybového momentu a tím i navýšení jeho hodnoty v poli příčle, což snižuje efektivitu rámové soustavy. [3] Z tohoto důvodu je nutné rohový spoj rámu optimalizovat a navrhnout ho s dostatečnou tuhostí. Tento děj je nejvíce výrazný u dvoukloubových rámu, kde dochází k zásadnímu poklesu hodnoty momentu. Redistribuce této rámové soustavy je znázorněna na následujícím schématu. [3] [15]



Obr. 11 - Redistribuce ohybového momentu: Tuhý rohový spoj (vlevo), Poddajný rohový spoj (vpravo)

Navýšení ohybového momentu vlivem prokluzu je nutné zohlednit v dimenzi průřezu příčle, čímž dochází k nevhodnému řešení a rámová konstrukce jako taková nemá plné využití. V případě trojkloubové soustavy není vliv redistribuce tolik patrný, ale kvůli výraznějšímu momentu v rámovém rohu je nutné počítat s náchylností ke štípnutí dřevěných konstrukčních prvků na vnějším okraji. [3] [8] Tento způsob porušení je možné eliminovat dostatečným rozšířením průřezu v místě spoje nebo případně zpevnit kritické místo pomocí hřebíků. [3]

Tuhost spoje v rámovém rohu závisí především na typu spojovacích prostředků a kvalitě dřevěných konstrukčních prvků. U mechanických spojů je nutné vždy počítat s

prokluzem, u kterého lze předpokládat zvětšení momentu v příčli v rozmezí 10 - 20 %, kdežto spoje chemické lze téměř považovat za tuhé. [15]

Tuhost je obecně charakterizovaná jako poměr zatížení a deformace, která vzniká vlivem tohoto působení. Značí se jako K a obvykle se udává v jednotkách MN/m, popřípadě MNm/rad. Zmíněná závislost vyplývá z následující rovnice. [20]

$$K \mathbf{x} = \mathbf{f}$$

Jedná se o základní deformační vztah, kde hodnota \mathbf{r} značí obecně deformační účinek a hodnota \mathbf{f} působící zatížení. [20]

V případě rámu je rozhodující ohybová tuhost, ale pro přesnost návrhu je vhodné zohlednit i tuhost ve vodorovném a svislém směru. Dle obecné deformační metody rozlišujeme následující složky celkové tuhosti: [20]

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,x} = \frac{N_{,x}}{\Delta u_{,x}}$ [MN/m]
- Tuhost ve svislém směru: $K_{,z} = \frac{V_{,z}}{\Delta u_{,z}}$ [MN/m]
- Tuhost v ohybu: $K_{,\varphi} = \frac{M_{,y}}{\Delta \phi_{,y}}$ [MNm/rad]

Za hodnoty $N_{,x}$; $V_{,z}$ a $M_{,y}$ se dosazují maximální vnitřní síly působící v rámovém rohu, které vycházejí z nejméně příznivé kombinace zatížení a $u_{,x}$; $u_{,z}$ a $\varphi_{,y}$ vyjadřují vzniklé deformace v tom styčnicku. [20]

Pro účely návrhu se jednotlivé složky tuhosti zavádí do výpočetního modelu pomocí pružné vazby, která simuluje polotuhý kloub. Následně jsou tomuto styčnicku uděleny hodnoty pro všechny 3 směry deformace a je vyhodnocena redistribuce ohybového momentu.

Přesné určení tuhosti spoje v rámovém rohu je možné vyhodnotit použitím metody konečných prvků, která je k dispozici například u softwarů jako je Dlubal RFEM nebo ANSYS. [21] Dále je možné také přibližné určení pomocí normy a vyjádření modulu prokluzu $K_{,ser}$, který je charakterizován pro standardní spojovací prvky. [11] [17]

Pouze s uvažováním těchto vlivů může být proveden dostatečně bezpečný návrh, u kterého je možné plné využití konstrukce a maximální optimalizace.

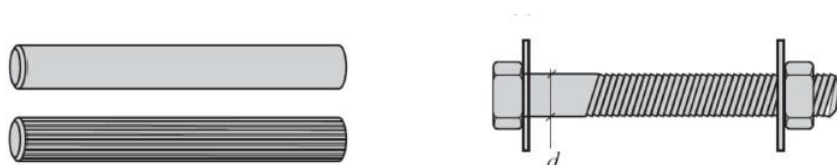
2.2 Typické spoje dřevěných rámových rohů

V současné době je používáno již velké množství typických spojů, které se v zásadě liší převážně v náročnosti výroby, ceně a vhodném použití z hlediska statického působení. Výběr daného spoje také úzce souvisí s požadavky na přepravu a montáž, což se odvíjí od požadovaného rozpětí a půdorysných rozměrů stavby. Mimo jiné jsou také stále rozvíjena nová alternativní provedení a jejich optimalizace. [13]

Principiálně je možné rozlišovat spoje podle působení na šroubované a lepené nebo případně i kombinované. Šroubovaný typ zahrnuje veškerá provedení, kde jsou použity ocelové spojovací prvky a jako typ lepený jsou označovány spoje, u kterých je styčník tvořen pouze slepením jednotlivých konstrukčních částí bez jakýchkoliv ocelových komponentů. V následujícím přehledu jsou podrobně rozebrány nejvíce používané varianty rámových rohů. [13]

2.2.1 Šroubované spoje

Jako šroubované spoje v rámovém rohu se označují všechny varianty s použitím mechanických spojovacích prostředků. Těmi jsou nejčastěji ocelové kolíky, svorníky nebo i hmoždíky. U menších rozpětí se můžeme setkat rovněž se šroubovým nebo hřebíkovým spojem. Typickým znakem těchto styčníků je především rozšíření průřezu dřevěných konstrukčních prvků v rámovém rohu tak, aby bylo možné umístění maximálního potřebného počtu spojovacích prvků, a aby zároveň samostatný dřevěný průřez přenesl působící vnitřní síly, z nichž je nejvíce zásadní ohybový moment. [13] [15]



Obr. 12 - Spojovací prvky: Ocelové kolíky (vlevo), Svorník (vpravo) [25]

Kromě použití rozdílných ocelových spojovacích prvků je také důležité rozlišení spoje dřevo - dřevo a ocel - dřevo. Rozhodujícím faktorem pro tuhost a únosnost spoje je ve většině případů kvalita dřevěných konstrukčních prvků a s tím spojená pevnost v otláčení. Dřevo jako ortotropní materiál má odlišné vlastnosti při působení mimo směr vláken, čímž se i výrazně snižují jeho pevnostní parametry a velmi tedy závisí na

zvolené geometrii styčnicku a umístění spojovacích prvků. [V] [4]

Hlavní výhodou šroubovaných rámových rohů je možnost realizace přímo na staveništi a tím tedy i méně složitá přeprava díky rozložení stojek a příčlí. Zároveň je však nutné počítat s vyššími náklady na montáž, která vyžaduje preciznost a velmi důkladné provedení. [15] [3] Typickou nevýhodou šroubovaných spojů je však náchylnost na rozštěpení dřeva v místě spojovacích prvků a při vnějším okraji, což je způsobeno vlivem změny vlhkosti v místě maximálního napětí. [V] [13] [22] Tomuto projevu lze zabránit například dostatečným navýšením dimenze průřezu v místě rámového rohu, přetažením příčle přes líc konstrukce nebo zpevněním pomocí hřebíků. [22] [13] Alternativou je také novodobější řešení, kdy je styk příčle a stojky opatřen vlepovanými závitovými tyčemi nebo zesílením z vnější strany pomocí překližky. [13]

Z hlediska použití spojovacích prvků jsou nejčastější ocelové kolíky, které se obvykle vyrábí v pevnostní třídě 4.6 standardně do průměru 30 mm a dále ocelové svorníky o stejné kvalitě standardně do průměru 36 mm. [V] [24] V dnešní době není výjimečné ani využití zalisovaných hmoždíků v kombinaci s dalšími spojovacími prvky. Kolíky a svorníky se aplikují pomocí hydraulického zařízení do předem předvrtaných otvorů nebo mohou být přímo zavrtávány pomocí speciální technologie. [5] Jednotlivé typy nepoužívanějších spojů jsou dále podrobněji specifikovány.

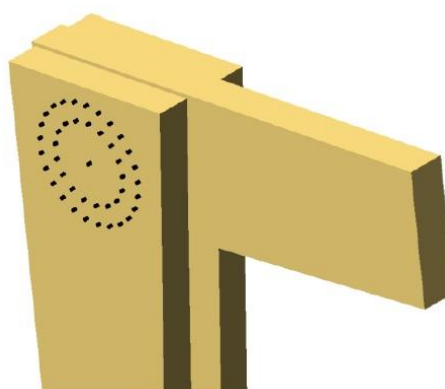
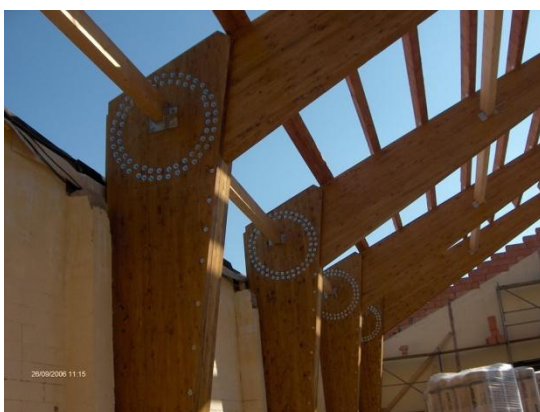
a) Kruhový šroubovaný styčník

Jedná se o nejvíce rozšířené provedení spoje v rámovém rohu, které je dlouhodobě osvědčené. Kruhové rozmístění spojovacích prvků je z hlediska tuhosti a pevnosti nejvhodnějším řešením i s ohledem na nutnost rozšíření průřezu dřevěných konstrukčních prvků. Nejběžnější variantou je použití ocelových kolíků, které spojují rámovou příčel vloženou mezi dvě samostatné stojky o stejném průřezu. V případě potřeby větší únosnosti se kolíky rozšiřují i o další řadu, která by však měla být provedena v odlišném modulu, aby došlo k prostřídání vzhledem ke středu otáčení. [5] Díky tomuto opatření působí spojovací prvky pod jiným úhlem a eliminuje se tak rozštípnutí dřeva. Alternativou je také spoj se svorníky, který může být proveden samostatně nebo i s použitím zalisovaných hmoždíků. Z hlediska geometrie platí pro všechny tyto prvky stejné podmínky a hlavní rozdíl spočívá v jejich únosnosti. [2] [24] [23]

V případě svorníkového spoje je únosnost oproti kolíkům navýšena vlivem

sepnutí a při kombinaci svorník - hmoždík je vyšší několikanásobně. [11] Vzhledem k náročnosti provedení jsou ovšem stále preferovanější kolíky, které však nesmí mít otvor v dřevěných konstrukčních prvcích větší než je hodnota jejich vlastního průměru a do spoje se osazují pomocí zarážení. [24] [23]

Kromě výhod jako je snadná montáž, doprava na staveniště nebo přijatelná cena má tento typ styčnicku také řadu zásadních nevýhod. Kvůli rozdílnému směru vláken ve stojce a příčli jsou i jednotlivé spojovací prvky vystaveny odlišnému namáhání, což způsobuje výraznou redukci únosnosti i tuhosti rámového rohu. Z tohoto důvodu je u kruhového šroubovaného styčnicku velmi patrný vliv prokluzu spoje.



Obr. 13 - Kruhový šroubovaný styčnick [VI] [23]

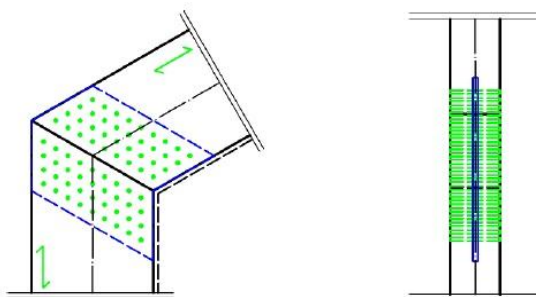
Možným způsobem uspořádání kolíků je i geometrie pravoúhlé sítě, která může být také dostatečně účinná, ale hrozí zde velké riziko rozštípnutí dřeva, což opět výrazně redukuje únosnost. [22] Zároveň je kritický shluk spojovacích prvků, kvůli kterému musí být zohledněno možné porušení blokovým nebo zátkovým smykem. [11] [2] Tento způsob rozmístění kolíků se však u rámových rohů používá jen zřídka a preferovanou variantou je kruhové členění. [22]

b) Šroubovaný styčnick s vnitřní ocelovou deskou

Dalším používaným způsobem je vytvoření styčnicku pomocí vložené ocelové desky, která je osazena do předem vytvořených zářezů a k jednotlivým konstrukčním prvků je připojena přes svorníky nebo kolíky. V tomto případě je příčel i stojka jednodílná a veškeré vnitřní síly jsou v místě styčnicku přeneseny do právě vložené desky. Návaznost samostatných dřevěných prvků je vytvořena přes diagonální seříznutí pod úhlem, který odpovídá geometrickému řešení rámové konstrukce, což závisí převážně na sklonu rámové příčle. Vlivem této návaznosti dochází k částečnému

spolupůsobení s deskou, ale z hlediska návrhu je pro přenos vnitřních sil uvažováno pouze s ocelovými prvky a styk příčle a stojky se zanedbává. [13] [26] Tento způsob provedení však není příliš rozšířený a jeho běžné použití je typické jen v některých zemích jako je například Japonsko nebo Kanada. [13]

Stejně jako u kruhového styčnicku je i u tohoto typu hlavní výhodou možnost montáže na staveništi a snadný transport, ale finančně je samostatný spoj nákladnější. Z hlediska statického působení je nutné brát v potaz fakt, že kvůli vložení dílčího komponentu se provádí mechanický spoj dvakrát, což zahrnuje dvojnásobné množství spojovacích prvků. Avšak v porovnání s kruhovým styčnickem je u této varianty počítáno s výrazně vyšší únosností díky působení přibližně ve směru vláken, což platí u rámové příčle i stojky. Tuhost spoje však závisí na nejslabším místě, kterým je mechanický spoj a pro maximální využití vložené ocelové desky je třeba použít dostatečné množství svorníků nebo odpovídající kvalitu dřeva. [13] [26]



Obr. 14 - Styčnick s vloženou ocelovou deskou [26]

V rámci návrhu se počítá s přenosem veškerých sil pouze do vložené desky, kterou je nutné posoudit i v místě oslabeného průřezu, kde se nachází předvrtané otvory pro osazení spojovacích prvků. Na základě posouzení je vyhodnocena dostatečná tloušťka desky, která se obvykle pohybuje v rozmezí 20 - 40 mm podle rozpětí rámu. Pro větší rozpon už by tento styčnick nebyl dostatečně efektivní. [26]

Některé inovativní návrhy zahrnovaly také variantu, kdy je ocelový prvek osazen z vnější strany, což však nesplňuje požadavky z hlediska požáru. Pouze provedení s vnitřní ocelovou deskou odpovídá požadovaným parametrům REI a splňuje dostatečně požární odolnost. [13]

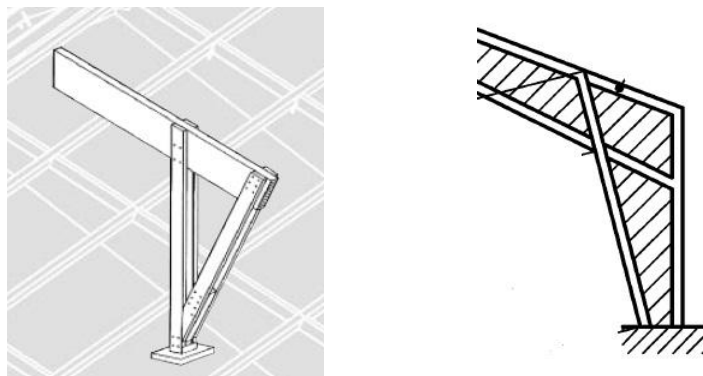
c) Rámová stojka tvaru V

V tomto případě se nejedná o pouhý styčnick, ale spíše o provedení rámové

stojky, která je rozčleněna na 2 prvky nebo případně řešena jako příhradová konstrukce. První část tvoří obvykle dvojdílná stojka, do které je pomocí kolíků nebo svorníků uchycena příčel s přesahem. Druhá část je jednodílná a spojuje dolní část stojky s koncem přesahu příčle. Tímto rozdělením vzniká mechanismus, který umožňuje přenos dvojice sil do základu a tím i přenos ohybového momentu. [13] U příhradového provedení je působení stejné a jako stojky ve tvaru V působí horní a dolní pás. Alternativou je také záměna jednodílného sloupku za ocelové táhlo, avšak pro tyto případy musí být důkladně prověřeny všechny kombinace zatížení, aby byly vyloučeny tlakové síly. [13] Obvykle však jeden z prvků stojky působí v tahu a druhý v tlaku.

Tento systém je však relativně zastaralý a v dnešní době byl nahrazen ostatními variantami. Je určen pro menší rozpětí, která jsou stanovena přibližně do 30 m v případě dvoukloubového rámu. Jeho výhody jsou opět snadná doprava a montáž, ale kvůli rozčlenění stojky vytváří zásah do prostoru, čímž snižuje dispoziční využití. [13] [4]

Na základě rozpětí jsou používány veškeré spojovací prvky od hřebíků až po svorníky a díky rozčlenění stojky nevzniká výrazný prokluz spoje. To však dostatečně nevyvažuje ostatní nevýhody systému a jeho využití je minimální. [13] [17]



Obr. 15 - Rámová stojka tvaru V (vlevo), Příhradová stojka (vpravo) [23] [17]

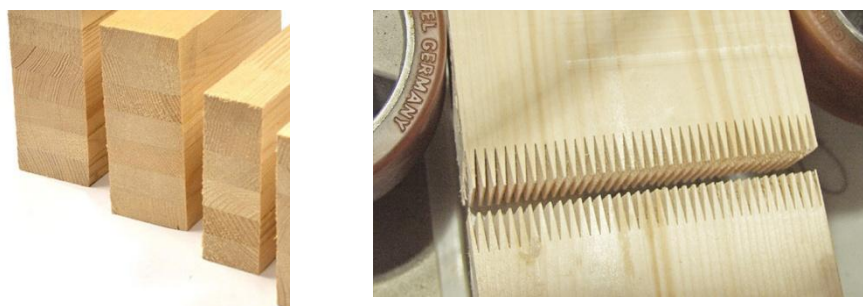
2.2.2 Lepené spoje

Provedení spojů pomocí lepení se začalo používat až s příchodem výroby lepeného lamelového dřeva, která v ČR započala v 50. letech 20. století. Avšak typizované spoje, které se dnes běžně používají byly vyvinuty ve skandinávských zemích a byly následně převzaty. [13] [II]

Výroba lepených spojů je zcela totožná s výrobním procese lepeného lamelového dřeva a jsou takto vytvořeny potřebné konstrukční části rámového rohu. Stejně jako u LLD jsou nejprve z rostlého dřeva vytvořeny nekonečné lamely pomocí

zubovitého spoje takzvaným cinkováním a následně dojde postupnému lepení potřebného průřezu a geometrického tvaru. Netypické a zakřivené provedení je vytvořeno přes modifikované šroubové lisy, které pomocí tlaku působí na vytvrzení lepidla v jednotlivých podélných spárách. Závěrem je možné upravit takovýto prefabrikát seříznutím na požadovaný dílec. [8] [II]

Rámové konstrukční prvky jsou optimalizovány na proměnný průřez, který se vytváří pomocí spojení lamel o různých tloušťkách. Dle normy je maximální možná tloušťka lamely 45 mm a obvyklým materiálem je smrkové dřevo, případně i modřín nebo dub. Dále je nutné před výrobou LLD dodržet maximální povolenou vlhkost dřeva 15 % z důvodu tvarové stálosti a případně vyřadit lamely, které požadavky nespĺňují. [II]



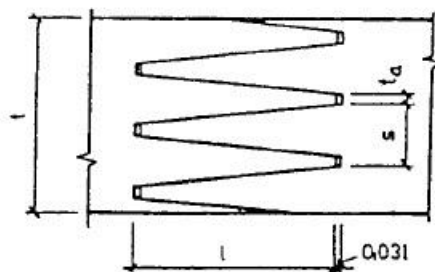
Obr. 16 - Lepené lamelové dřevo (vlevo), Lepený zubovitý spoj (vpravo) [VIII] [IX]

Kvalita spoje v rámovém rohu u tohoto typu je z velké části závislá na pevnostní třídě dřevěných konstrukčních prvků, ale především se odvíjí od kvality použitého lepidla na styku stojky a příčle. Pro výběr vhodného a dostatečně únosného lepidla dle provozních podmínek slouží dvě klasifikační třídy. [5] [13]

- I. třída - lepidla do venkovních podmínek a teplot nad 50 ° C, třída provozu 1-3
- II. třída - lepidla pro vnitřní prostory a teplot do 50 ° C, třída provozu 1

Kromě této základní specifikace se typy lepidel liší také v zabarvení, což je u dřevěných pohledových rámu často rozhodující pro výběr. Mezi typická lepidla spadající do první třídy, která se v současnosti používají pro lepení dřevěných prvků, patří například melaninová pryskyřice, rezorcinová pryskyřice, jednosložkový polyuretan nebo epoxidová pryskyřice. Z těchto uvedených je však obecně vhodným a použitelným typem pro LLD pouze rezorcinová pryskyřice, která splňuje veškerá pevnostní kritéria a je použitelná i v nepříznivých podmínkách. [13] Zástupcem druhé třídy je pouze močovinná pryskyřice, která však pro lepení LLD není příliš vhodná. [5]

Důležitým parametrem pro vytvoření funkčnosti lepeného spoje je dále zubovitý spoj na koncích konstrukčních prvků, jehož rozměry a četnost se stanovují podle typu konstrukce. Rozměrové provedení blíže specifikuje následující schéma. [3]



Obr. 17 - Velký zubovitý spoj [8]

Hustota zazubení a délka jednotlivých zubů se určuje podle rozpětí rámu a také podle úhlu mezi působící silou a směrem vláken. Obecně platí, že menším odklonu od směru vláken je spoj únosnější. Pro rámové konstrukce se používá takzvaný velký zubovitý spoj, pro který platí tyto parametry: $l = 60 \text{ mm}$, $t, a = 2 \text{ mm}$. [8] [13] Do jednotlivých zářezů se nanáší lepidlo o tloušťce vrstvy 0,1 - 0,2 mm, která však nesmí překročit 1,0 mm. [5] Jednotlivé zuby jsou konstruovány svisle po výšce průřezu tak, aby působily ve směru ohybu. [13]

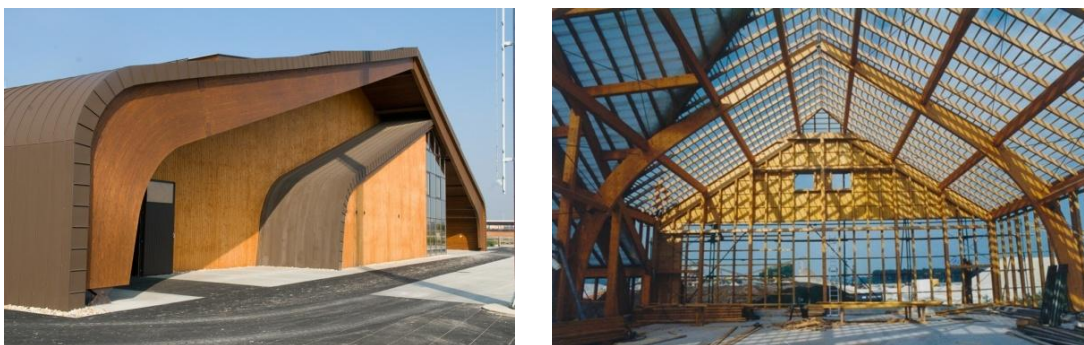
Lepené spoje jako takové vykazují velkou tuhost a únosnost, jsou však náchylné na okolní podmínky a zároveň také křehké, což je velké riziko v případě porušení. [13] Jednotlivé typy lepených rámových rohů jsou dále podrobněji specifikovány.

a) Zakřivený lepený rámový roh

Zakřivený rámový roh se provádí jako souvislá část konstrukčního prvku, který v tomto případě tvoří zároveň rámovou stojku i příčel. Z pravidla se jedná o trojkloubový rám z lepeného lamelového dřeva, který má po délce optimalizovanou výšku průřezu dle působících vnitřních sil. Vzhledem k tomuto statickému systému je v místě rámového rohu velmi vysoká hodnota ohybového momentu a průřez je tedy maximálně rozšířen. [13] Dále v zakřiveném místě také výrazně působí tah kolmo na vlákna průřezu. [26]

Z hlediska výroby je obvyklé zakřivení rámu o vnitřním poloměru 3 - 5 m a použití tohoto rámového systému je vhodné na maximální rozpětí 50 m. Mimo jiné je nutné při výrobě počítat s vnášením napětí do jednotlivých lamel vlivem ohýbání a navrhnout tedy jejich dostatečnou šířku, aby plnili svou únosnost i po zabudování do

konstrukce a po vnesení plného zatížení. [13] Kvůli provedení stojky a příčle v jednom kuse je při větším rozpětí rámu problematická doprava na staveniště a musí být využit speciální transport. Alternativou je také provedení mechanického spoje tak, aby bylo možné konstrukční prvek rozložit, což je však nežádoucí. Díky kompletnímu provedení z lepeného lamelového dřeva je však možné tento systém dokonale optimalizovat a docílit tak maximálně úsporného řešení.



Obr. 18 - Zakřivený lepený rámový roh [VI] [27]

b) Přímý lepený styčník

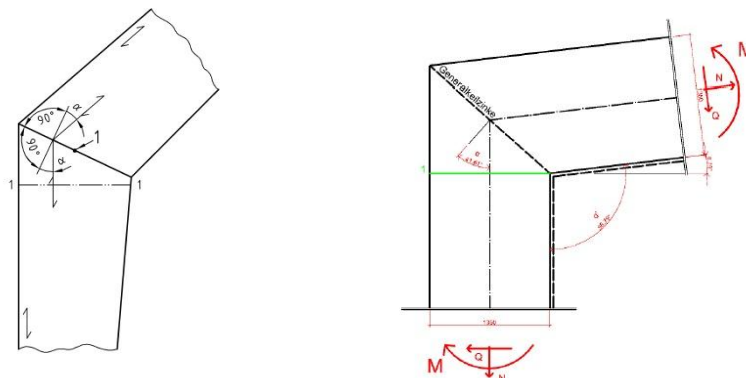
Tento typ rámového rohu je proveden jako přímé napojení rámové stojky a příčle pomocí velkého zubovitého spoje, který je veden diagonálně na styku konstrukčních prvků pod výrazným úhlem. Dle normy DIN 1052 je nutné diagonálu vytvořit tak, aby byl svírán stejný úhel mezi stykovou linií a směrem vláken v případě stojky i příčle. [17]

Přímý lepený styčník je určen pro třídu provozu 1 nebo 2 a nesmí být vystaven horším vlivů prostředí. Jeho výroba může být prováděna pouze v prostředí, kde teplota neklesne pod 20 ° C, což je nejdůležitější pro lisování a vytvrzování lepidla. [5] Z tohoto důvodu je obvyklé rám lepit dopředu v zázemí výrobní haly, ale kvůli složitému transportu je možné lepení provádět rovněž přímo na staveništi. Musí však být dodrženy veškeré výrobní podmínky včetně minimální stanovené teploty. [5]

Vzhledem k diagonálnímu napojení pod výrazným úhlem dochází ke značné redukci únosnosti, čímž je tento styčník velmi znevýhodněn. Tímto vlivem je nutné snížit jak únosnost v tlaku, tak i v ohybu. Mimo jiné je náročná doprava konstrukce na staveniště, pokud je rám předem připraven a z finančního hlediska není ani provedení spoje příliš úsporné. [12] [26] Z těchto důvodů se nejedná o preferovanou variantu.

Spoje vytvořené pomocí lepení jsou obecně považovány za téměř tuhé a u

tohoto typu styčnicku tedy nedochází k žádnému prokluzu. Tuhost a únosnost po celou dobu životnosti je však závislá na kvalitě použitého lepidla a zazubení a v rámci posouzení je nutné tento způsob provedení zohlednit. [13]



Obr. 19 - Přímý lepený styčník [17] [26]

Dle DIN 1052 se v případě posudku normálového napětí redukuje účinná plocha průřezu a průřezový modul na 80 %. Dále při působení kladného momentu nesmí vzniklý tah kolmo k vláknům překročit 20 % únosnosti a z důvodu možného výskytu suků a nelinearit v rámové rohu se jako charakteristická únosnost uvažuje vždy hodnota o jednu třídu nižší než je navržená třída pevnosti dřeva. [17] [26]

c) Dvojitý lepený styčník

Dvojitý lepený styčník je svým provedením téměř totožný s předchozí variantou. Rozdíl je pouze ten, že se mezi rámovou příčel a stojku vkládá samostatný prvek z lepeného lamelového dřeva, který je oboustranně napojen pomocí velkého zubovitého spoje. Stejně jako u předchozího typu je i v tomto případě dle DIN 1052 stanovena geometrie, která opět určuje dodržení stejného úhlu mezi stykovou linií a směrem vláken, avšak u této varianty se jedná o diagonály na kontaktu s vloženým dílcem. Dále je také stanovena minimální délka vnitřní hrany vloženého prvku na 200 mm, podle níž je zároveň určen směr vláken. [17] [6]

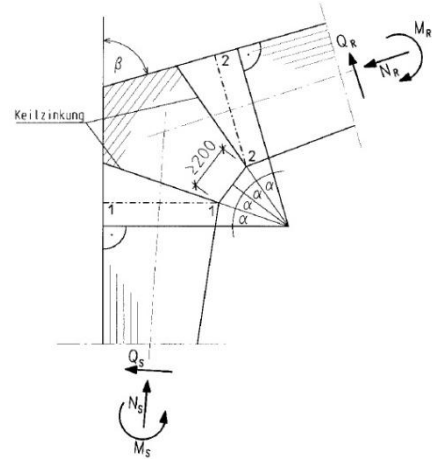
Díky vloženému dílci je toto provedení z hlediska únosnosti výrazně výhodnější. Jednotlivé komponenty jsou napojeny pod minimálním úhlem a nedochází tak k příliš velké redukci únosnosti, což by v případě pravoúhlého rámu se sevřeným úhlem 0° znamenalo, že by se redukce neprojevila vůbec. Požadavky na omezení únosnosti a zohlednění lepeného spoje jsou zcela totožné s předchozím typem styčnicku dle DIN 1052. [17] [13]

Z důvodu vytvoření dvojitého zubovitého spoje, kde je kladen velký důraz na

přesnost, je téměř vyloučené provádět u tohoto typu montáž až na staveništi a je tedy nutné počítat s možným komplikovaným transportem, což je při větších rozpětích značnou nevýhodou. Naopak je tímto zaručen vysoký stupeň prefabrikace, díky čemuž je urychlena celá výstavba. [13]



Obr. 20 - Dvojitý lepený styčník [VII] [12]



2.2.3 Kombinované spoje

Jako kombinované spoje jsou označovány ty, u kterých je zároveň použit mechanický i chemický způsob provedení rámového rohu. Základem je tedy ocelový spojovací prvek, který je s dřevěnou konstrukcí propojen pomocí lepicí složky. Použití této kombinace je běžné především v Německu nebo skandinávských zemích. V ČR není příliš obvyklé a je spíše zkoumáno a zdokonalováno. [4]

Díky tomuto provedení je v porovnání s lepenými spoji eliminován křehký lom v případě poruchy a je dosaženo vysoké hodnoty tuhosti, která je vyšší při vlepění spojovacích prvků rovnoběžně s vlákny. To však neplatí pro únosnost, u které jsou prokázány výraznější hodnoty v opačném směru kolmo na vlákna. [4] Vzhledem k úplnému krytí ocelových komponentů dřevěnými konstrukčními prvky je rovněž zaručena dostatečná požární odolnost a jsou splněny veškeré parametry REI. [5]

V současné době se stále vyvíjí různá alternativní provedení pro spojení rámu menších rozpětí, avšak pro standardní dřevěné rámové konstrukce je běžně používán pouze systém s vlepěnými ocelovými pruty. Tento typ rámového rohu bude dále podrobněji rozebrán. [25]

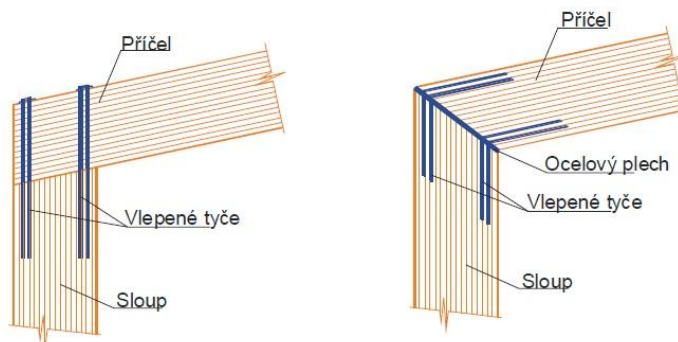
Styčník s vlepěnými ocelovými pruty

Tato technologie se obvykle používá u konstrukčních prvků z lepeného lamelového dřeva, výjimkou však není ani dřevo rostlé. Základem je předvrtání otvorů

o dostatečném průměru a délce, ve směru potřebného spojení konstrukčních prvků. Následně je do otvoru aplikována lepicí složka tak, aby došlo k rovnoměrnému rozložení po celé ploše a na závěr jsou osazeny ocelové spojovací prvky. [13] [14]

Materiálové provedení ocelových prutů je obvyklé ve dvou základních variantách. Prvním typem jsou ocelové závitové svorníky do průměru 30 mm o maximální délce 3 m, které mohou být vyrobeny v různých pevnostních třídách. Druhou možností je betonářská žebírková ocel v kvalitě BSt 500 S do průměru 25 mm. Z důvodu možné koroze je vhodné ocelové pruty opatřit ochranou vrstvou jako je například povlak zinku nebo je také možné využít vlastnosti některých lepicích složek, které proti korozi působí. [4] [5] [14]

Ocelové pruty se osazují do předvrtaného otvoru, který je obecně možné vytvořit o 1 mm větší a následně provést injektáž lepidla pomocí dvou injektážních závrtů po délce vlepaného prutu. Pro tento způsob je vhodné používat pouze závitové tyče a injektáž provést s patřičnou rovnoměrností, aby bylo zaručeno dostatečné spolupůsobení. Alternativou je předvrtání o 1 mm menší, kdy se vrt napustí lepicí složkou a závitová tyč se následně zašroubuje. V tomto případě je nutné opatřit tyč podélnou drážkou pro průchod lepidla. Jako lepicí složky se nejčastěji používají epoxidová, dvousložková polyuretanová nebo fenolrezorcínová lepidla. [4]



Obr. 21 - Styčník s vlepenými ocelovými pruty [25]

Z hlediska statiky je nejdůležitější použít dostatečně kvalitní lepicí složku, aby byla zaručena patřičná tuhost a zároveň zvolit vhodný typ výztuže pro odpovídající únosnost, u které se rozlišuje namáhání ve směru dřívku a ve stříhu. Obecně únosnost závisí na objemové hmotnosti dřeva, délce vlepení a průměru výztuže. [4] [5]

Vlepané ocelové pruty jsou velmi únosnou a výhodnou variantou, avšak jejich provedení není možné na staveništi a je nutné počítat s komplikovanou dopravou, což je značná nevýhoda. [4]

2.3 Analýza vybraných spojů

Pro další podrobnější numerický rozbor, zpracování statického působení a vyhodnocení nejdůležitějších vlivů bylo vybráno jen několik typů styčníků, které budou použity pro optimalizaci. Jedná se pouze o mechanické spojovací prostředky, které je možné lépe optimalizovat a v porovnání s lepeným provedením je tato varianta mnohem více rozšířená a obecně lépe aplikovatelná. Hlavním důvodem je možnost montáže přímo na staveništi nebo snadnější proveditelnost. Mimo jiné je v případě použití velkého zubovitého spoje výrazně redukována únosnost a toto řešení je ze statického hlediska vhodné spíše pro větší sklon příčle vůči rámové stojce.

Dále bude provedeno porovnání tuhosti a únosnosti pouze u těchto variant:

- Kruhový šroubovaný styčník
- Víceřadý kruhový šroubovaný styčník
- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

Na základě tohoto teoretického vyhodnocení bude poté na vybrané rámové konstrukci pomocí softwaru navrženo optimální řešení rámového rohu.

2.3.1 Kruhový šroubovaný styčník

Základní problematikou kruhového rozmístění spoje je, že každý dílčí prvek působí pod jiným úhlem na směr vláken, která jsou navíc v rozdílném směru u příčle i stojky. V případě tuhosti je tento vliv zanedbatelný a v rámci návrhu se uvažuje jednotná hodnota modulu prokluzu K_{ser} . V případě únosnosti je však nutné tento vliv zohlednit a únosnost redukovat. [4]

a) Tuhost spoje

U šroubovaného styčníku s kruhovou geometrií je tuhost naprosto rozhodující a ovlivňuje celkový prokluz spoje, který bývá v tomto případě velmi výrazný, a jeho vlivem dochází k redistribuci ohybového momentu. Dále je nutné zohlednit tuhost spoje také na konci životnosti konstrukce, která je redukována kvůli dotvarování dřevěných konstrukčních prvků. [5] [4] Pro mezní stav únosnosti je tuhost určena podle následujících vztahů. [16] [26] [12]

1. V čase $t = 0$:

- Tuhost v ohybu:
$$K_{r,\phi} = \frac{2}{3} K_{ser} \times I_p$$
$$I_p = \sum r_i^2$$
$$\rightarrow K_{r,\phi} = \sum \frac{2}{3} K_{ser} \times r_i^2$$
- Tuhost ve vodorovném a svislém směru:
$$K_{r,x} = K_{r,z} = \sum \frac{2}{3} K_{ser}$$

V uvedených vztazích vyjadřuje I_p polární moment setrvačnosti dle uspořádání spojovacích prvků, K_{ser} modul prokluzu jednoho spojovacího prvku a r_i poloměr kružnice, na které leží spojovací prvek vůči středu otáčení. [5] [4] [26] [12]

2. V čase $t = \infty$:

- Tuhost v ohybu:
$$K_{r,\phi,fin} = \sum \frac{2}{3} \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 \times k_{def})} \times r_i^2$$
- Tuhost ve vodorovném a svislém směru:
$$K_{r,x,fin} = K_{r,z,fin} = \sum \frac{2}{3} \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 \times k_{def})}$$

Pro posouzení na konci životnosti je do výpočtu zahrnuta hodnota k_{def} , která vyjadřuje součinitel pro zjišťování dotvarování s uvážením příslušné třídy provozu a dále hodnota ψ_2 , což je součinitel pro kvazistálou hodnotu zatížení vyvolávajícího největší napětí ve vztahu k pevnosti. [5] [4] [26] [12]

Jako spojovací prvky se u tohoto typu rámového rohu používají ocelové svorníky nebo kolíky, jejichž tuhost je vyjádřena stejným vztahem a je srovnatelná. [11]

- Tuhost spojovacího prvku:
$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \times \frac{d}{23}$$

V tomto vztahu vyjadřuje ρ_m hustotu použitého dřeva a d průměr spojovacího prvku. V případě, že mají konstrukční části rozdílnou hustotu, je nutné postupovat podle následujícího vztahu.

- Průměrná hustota dřeva:
$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \times \rho_{m,2}}$$

Kde $\rho_{m,1}$ značí hustotu prvního konstrukčního prvku a $\rho_{m,2}$ hustotu druhého. [11]

Z podrobnějšího rozboru tedy vyplývá, že tuhost v případě kruhového šroubovaného styčnicku závisí především na kvalitě použitého dřeva $\rho_{m,i}$, na průměru spojovacích prvků d , jejich geometrickém rozmístění, s čímž souvisí poloměr kružnice r_i a dále na provozních podmínkách, které mají vliv na tuhost spoje na konci životnosti. [11] [16] [12]

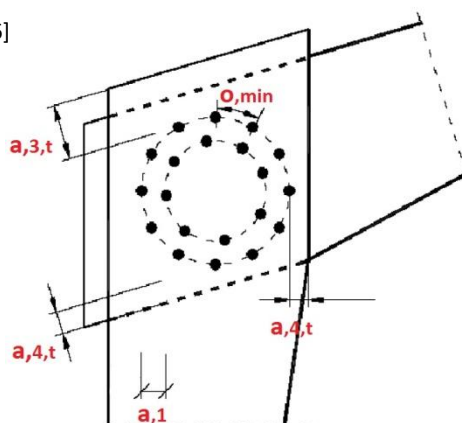
Vzhledem k působícímu prokluzu spoje je pro potřeby předběžného návrhu možné počítat s redistribucí ohybového momentu okolo 20 %, což se zohlední při posouzení únosnosti a na základě ověřeného konstrukčního rozmístění a přesných materiálových charakteristik je možné hodnotu tuhosti zpětně ověřit nebo případně navýšit a proces opakovat. [13]

V případě použití hodnoty modulu prokluzu K_{ser} pro mezní stav použitelnosti platí totožné vzorce bez dosazení redukční hodnoty $\frac{2}{3}$, což je potřebné například pro vyjádření maximálního průhybu rámové konstrukce. [16]

b) Únosnost spoje

Návrh rámového rohu je závislý především na únosnosti spoje, která se ověřuje s určitým nadvýšením ohybového momentu tak, aby byla zohledněna momentová redistribuce vznikající vlivem prokluzu. Pro tyto účely je možné použít odhad redistribuce okolo 20 % nebo její rozsah určit pomocí parametrického modelu, kde je rámovému rohu udělena maximální hodnota tuhosti vycházející z předchozích vztahů nebo modelu MKP. [13]

Základním parametrem pro návrh, ze kterého je nutné vycházet jsou minimální vzdálenosti pro stanovení geometrie spoje. Bližší specifikace je znázorněna na následujícím schématu. [26]



Obr. 22 - Minimální vzdálenosti pro stanovení geometrie spoje [26]

Dle ČSN EN 1995-1-1 jsou uvedené hodnoty pro kolíkový spoj stanovené následovně:

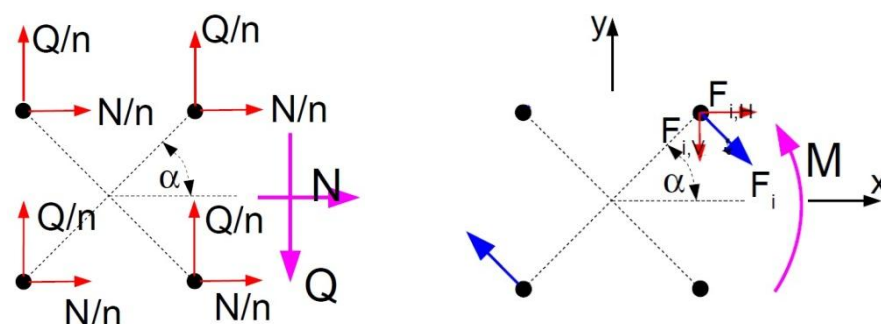
- Min. rozteč mezi kolíky II s vlákny: $a_1 = (3 + 2 \times (\cos \alpha)) \times d$
- Min. vzdálenost od zatíženého konce: $a_{3,t} = \max(7 \times d; 80 \text{ mm})$
- Min. vzdálenost od zatíženého okraje: $a_{4,t} = \max((2 + 2 \times (\sin \alpha)); d; 3d)$
- Min. oblouková vzdálenost kolíků: $o_{min} = 6 \times d$

Hodna α zde vyjadřuje úhel, pod kterým působí výslednice sil na dílčí spojovací prvky a hodnota d průměr spojovacího prvku. Vzhledem k tomu, že se obvykle kruh umísťuje symetricky, je nejčastěji dodržena stejná hodnota od všech okrajů a to maximální možná, což je v tomto případě $7d$. [16] Totéž platí i u ostatních vzdáleností, kde má úhel α vliv a pro zjednodušení je uvažováno také s maximální hodnotou. [12] [26]

Na základě vyhodnocené geometrie spoje je možné dále určit maximální počet spojovacích prvků n , které je vhodné rozmístit tak, aby byly co nejdál od středu otáčení a ležely na co nejdelším rameni r . Po upřesnění celkového počtu kolíků je již možné rozdělit působící vnitřní síly v rámovém rohu na jednotlivé prvky podle následujících vztahů: [12] [26]

- Dílčí složka normálové síly: $F_N = \frac{N}{\sum n_i}$
 - Dílčí složka posouvající síly: $F_V = \frac{V}{\sum n_i}$
 - Dílčí složka od ohybového momentu: $F_M = \frac{M}{I_p} \times r_i$
- $F_M = \frac{M}{\sum r_i^2} \times r_i$

Hodnoty N , V , M vyjadřují maximální působící vnitřní síly a musí být rozlišovány pro posouzení rámové příčle a stojky. Rozklad vnitřních sil na dílčí složky je znázorněn na následujících schématech.



Obr. 23 - Rozklad vnitřních sil [26]

Jak je patrné z uvedených rovnic a schémat, tak kromě normálové síly F_N a posouvající síly F_V působí na každý ocelový kolík také tečná síla F_M vyvolaná ohybovým momentem, která je vyjádřena na základě ramene od středu otáčení. Tečná síla působící pod úhlem je tedy rozdělena na vodorovnou a svislou složku a následně sečtena s ostatními silami. Takto je možné vyjádřit celkovou výslednici a také úhel, který svírá se směrem vláken daného konstrukčního prvku. [12] [26]

Vodorovnou a svislou složku tečné síly od ohybového momentu lze určit pomocí základních goniometrických funkcí pro úhel β podle těchto vztahů: [3] [26]

- Odklon F_M od směru vláken: $\beta = 90^\circ - \alpha$
- Vodorovná složka F_M : $F_{M,N} = \cos \beta \times F_M$
- Svislá složka F_M : $F_{M,V} = \sin \beta \times F_M$

Úhel α v tomto případě vyjadřuje odklon ramene dílčího spojovacího prvku od směru vláken. [26] Po vyjádření těchto složek se výslednice sil a celkový úhel, pod kterým působí určí následovně: [3] [26]

- Výslednice sil působících na jeden spojovací prvek:

$$F_D = \sqrt{(F_N + F_{M,N})^2 + (F_V + F_{M,V})^2}$$

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken pro vnější prvek:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{F_V + F_{M,V}}{F_N + F_{M,N}} \right)$$

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken pro vnitřní prvek:

$$\alpha_2 = \gamma - (90^\circ - \alpha_1)$$

Hodnota γ zde značí úhel, který svírá rámová stojka a příčel, čímž je vytvořen obvykle sklon zastřešení. [4]

Následně se z určených hodnot vyjádří charakteristická pevnost v otláčení pro dílčí spojovací prvky se zohledněním působení pod úhlem k vláknům. [11] [16]

- Charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny:

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

- Součinitel pro jehličnaté dřeviny:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d$$

- Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Tato redukce se provede pro všechny kolíky v celém spoji a to pro oba konstrukční prvky. Následně se vyhodnotí prvek s nejnižší únosností, který bude použit pro posouzení. Únosnost pro dvojstřížné kolíky použité na spoj dřevo - dřevo je určena podle následujících vztahů. [11] [16]

- Poměr mezi pevnostmi v otláčení: $\theta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$
- Charakteristický plastický moment únosnosti: $M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6}$
- Charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku (dřevo - dřevo, dvojstřížný spoj): $F_{v,Rk} = \min$

$$f_{h,1,k} \times t_1 \times d$$

$$0,5 \times f_{h,2,k} \times t_2 \times d$$

$$1,05 \times \frac{f_{h,1,k} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \times \left(\sqrt{2 \times \beta \times (1 + \beta)} + \frac{4 \times \beta \times (2 + \beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times d \times t_1^2} - \theta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times \beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Minimální hodnota vycházející ze všech uvedených vztahů je rozhodující pro únosnost pro jeden stříh kolíku. Hodnoty $f_{h,1,k}$ a $f_{h,2,k}$ udávají pevnost v otláčení u stojky a příčle, t_1 tloušťku vnější stěny spoje a t_2 tloušťku vnitřní stěny spoje. $F_{ax,Rk}$ zohledňuje vliv sepnutí spoje, avšak v případě ocelových kolíků sepnutí nepůsobí a tento vliv se zanedbává. [11] [16]

Výsledná hodnota únosnosti je vyjádřena s redukcí pomocí dílčího součinitele vlastnosti materiálu γ_M a modifikačního součinitele k_{mod} , který zohledňuje vliv trvání zatížení a vlhkosti. [16]

- Návrhová únosnost pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \times \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M}$$

V rámci MSÚ je nutné porovnat návrhovou únosnost pro dvojstřížný spoj s výslednicí působících vnitřních sil pro každý dílčí spojovací prvek a musí být prokázáno, že nedojde k jejímu překročení. [16]

- Posouzení MSÚ:
$$\frac{F_D}{2 \times F_{v,Rd}} \leq 1,0$$

U kruhového šroubovaného styčnicku je mimo jiné také nutné posoudit smykové napětí působící v oblasti spoje, které je vyjádřeno následovně: [12] [3]

- Maximální posouvající síla od ohybového momentu:

$$V_M = \frac{M}{\pi} \times \frac{\sum r_i}{\sum r_i^2}$$

- Smyková síla působící v místě kolíkového spoje:

$$V_D = V_M - \frac{V}{2}$$

Výsledná síla V_D je maximální hodnota vyvolávající smykové napětí a je tedy rozhodující pro posouzení MSÚ, které je formulováno následovně. [16] [11]

- Maximální smykové napětí:
$$\tau_V = 1,5 \times \frac{V_D}{b \times h}$$
- Návrhová smyková únosnost:
$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

Hodnoty b , h v uvedených vztazích označují rozměry daného průřezu a $f_{v,k}$ charakteristickou smykovou únosnost. Stejně jako v předchozích případech je nutné provést posouzení pro rámovou stojku i příčel. [16] [11]

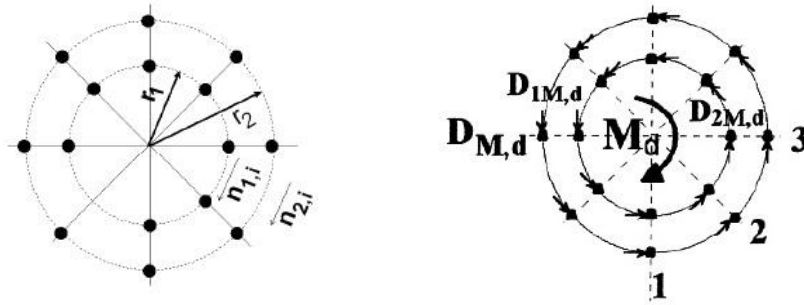
- Posouzení MSÚ:
$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

Kromě tohoto posouzení je nutné také ověřit samotné konstrukční prvky v těsném blízkosti rámového styčnicku, což je však spíše otázkou optimalizace samostatného rámu a tento posudek bude zahrnut v další části této práce. [12]

2.3.2 Víceřadý kruhový šroubovaný styčnick

V porovnání s předchozí variantou se jedná o téměř totožné řešení, kde je pouze doplněn další vnitřní kruh spojovacích prvků pro zajištění větší únosnosti. Může být zvolen například jiný průměr kolíků a jejich rozmístění tak, aby neležely v jedné linii vůči středu otáčení. Obvykle je však kladen důraz na maximální počet spojovacích prvků působících na co největším rameně. Z hlediska geometrie je v tomto případě

zásadní pouze minimální rozteč mezi kolíky rovnoběžně s vlákny α_1 , která je ze strany bezpečnosti určena jako maximum $5d$. [16] [17]



Obr. 24 - Vícenásobný kruhový styčnick: Geometrie spoje (vlevo), Rozklad tečných sil (vpravo) [12]

Hlavním rozdílem u této varianty je však efektivnost působení všech dílčích spojovacích prvků, které jsou v rámovém styčnicku rozmístěny. Vzhledem k relativně malým vzdálenostem mezi oběma řadami je nutné brát v potaz spolupůsobení a celkovou únosnost tedy redukovat. Podle DIN 1052 by měl být efektivní počet působících prvků uvažován takto: [17]

- Účinný počet spojovacích prvků: $n_{ef} = 0,85 \times n$

Hodnota n značí celkový počet prvků ve vnější i vnitřní kružnici. Na základě této redukce se následně vyhodnotí tuhost a velikosti působících vnitřních sil. [26]

a) Tuhost spoje

- Tuhost v ohybu: $K_{r,\phi} = 0,85 \times \sum \frac{2}{3} K_{ser} \times r_i^2$
- Tuhost ve vodorov. a svisl. směru: $K_{r,x} = K_{r,z} = 0,85 \times \sum \frac{2}{3} K_{ser}$

Stejným způsobem se vyjádří tuhost v čase $t = \infty$.

b) Únosnost spoje

- Dílčí složka normálové síly: $F_N = \frac{N}{n_{ef}}$
- Dílčí složka posouvající síly: $F_V = \frac{V}{n_{ef}}$
- Dílčí složka od ohybového momentu: $F_M = \frac{M}{0,85 \times \sum r_i^2} \times r_i$

Postup pro posouzení únosnosti je dále zcela totožný s předchozí jednořadou variantou a vyhodnotí se opět dvojtřížné působení u všech dílčích spojovacích prvků.

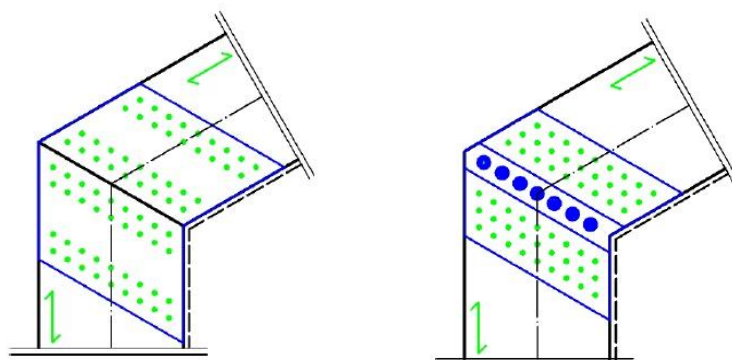
V případě smykového napětí se efektivní počet prvků nezahrnuje. [26]

Míra zvýšení únosnosti a celkové efektivity po přidání další řady ocelových kolíků bude podrobněji znázorněna a vyhodnocena v další části této práce.

2.3.3 Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

Alternativním řešením mechanického spoje může být kromě kruhového rozmístění spojovacích prvků také členění pravoúhlé. Obvykle se jedná o symetrickou geometrii v obdélníkovém nebo lichoběžníkovém rozvržení a může být rovněž použita ocelová styčníková deska k zajištění větší tuhosti.

Varianta s vloženou ocelovou deskou bude součástí této analýzy a bude vytvořena taková geometrie, aby byla zajištěna dostatečná únosnost a zároveň maximální úspora materiálu. V porovnání s kruhovým styčníkem jsou u tohoto řešení použity také ocelové kolíky, ale je předpokládán výrazný rozdíl v únosnosti a tuhosti spoje ocel - dřevo. Pro zjednodušení návrhu se neuvažuje působení na kontaktu dřevěných konstrukčních prvků, ke kterému může docházet na spoji rámové stojky a příčle a předpokládá se plné využití ocelových kolíků a vložené styčníkové desky.



Obr. 25 - Rámový roh s vloženou styčníkovou deskou [26]

a) Tuhost spoje

Stejně jako u víceřadého kruhového spoje je i v tomto případě třeba zohlednit účinný počet působících spojovacích prvků. U tohoto provedení se však jedná o působení ve směru vláken a je možné vycházet z ČSN EN 1995-1-1, která danou problematiku specifikuje následovně. [16]

- Účinný počet spojovacích prvků:

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

Hodnota a_1 zde vyjadřuje vzdálenost mezi jednotlivými spojovacími prvky ve směru vláken, n skutečný počet prvků a d jejich průměr. [16] [17] Tato redukce se používá jak v případě tuhosti, tak i únosnosti.

Tuhost je stejně jako u předchozích případů vyjadřována pro MSÚ a MSP v závislosti na čase. Pro mezní stav únosnosti je definována následovně: [12] [26] [4]

1. V čase $t = 0$:

- Tuhost v ohybu:
$$K_{r,\phi} = \frac{n_{ef}}{n} \times I_p \times \frac{2}{3} K_{ser}$$
$$I_p = \sum (x_i^2 + z_i^2)$$
$$\rightarrow K_{r,\phi} = \frac{n_{ef}}{n} \times \sum \frac{2}{3} K_{ser} \times (x_i^2 + z_i^2)$$

- Tuhost ve vodorovném a svislém směru:

$$K_{r,x} = K_{r,z} = \frac{n_{ef}}{n} \times \sum \frac{2}{3} K_{ser}$$

V uvedených vztazích vyjadřují hodnoty x_i a z_i vzdálenosti daného spojovacího prvku od středu otáčení. [2] [4]

2. V čase $t = \infty$:

- Tuhost v ohybu:
$$K_{r,\phi,fin} = \frac{n_{ef}}{n} \times \sum \frac{2}{3} \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 x k_{def})} \times (x_i^2 + z_i^2)$$

- Tuhost ve vodorovném a svislém směru:

$$K_{r,x,fin} = K_{r,z,fin} = \frac{n_{ef}}{n} \times \sum \frac{2}{3} \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 x k_{def})}$$

Tento rámový spoj je v porovnání s předchozími variantami definován jako typ ocel - dřevo a modul prokluzu jednoho spojovacího prvku je vyjádřen pouze v DIN 1052 následovně. [12]

- Tuhost spojovací prvku:
$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \times \frac{d}{20}$$

Další podmínky pro vyjádření tuhosti včetně posouzení mezního stavu použitelnosti jsou totožné s předchozími případy (viz. 2.3.1 a)).

b) Únosnost spoje

Z hlediska únosnosti je posouzení tohoto rámového rohu výrazně složitější a je nutné konstrukční řešení rozdělit na ocelovou styčnickovou desku a dřevěné prvky se

spojovacími komponenty. Vzhledem k výrazně vyšší únosnosti kolíků v kontaktu s ocelovou deskou, však budou spojovací prvky posuzovány pouze na porušení v kontaktu se dřevem a návrh bude tímto zjednodušen, což je pro účely této práce dostačující. Ve fázi analytického modelu budou tyto hodnoty alespoň ověřeny pomocí tabulek a vše bude popsáno.

1. Ocelová styčnicková deska

Samotná vložená ocelová deska přenáší veškeré působící vnitřní síly N , V , M z jednoho dřevěného konstrukčního prvku na druhý a je nutné ji samostatně posoudit na ohyb, tah a smyk a to především v kritickém řezu, kde je oslabená otvory pro spojovací prvky. [28]

Základem návrhu styčnickové desky je určení minimálních vzdáleností mezi jednotlivými spojovacími prvky. Tyto hodnoty vyplývají z ČSN EN 1993-1-1 pro daný průměr spoje a budou určeny tabulkově jako běžné rozměry. Za referenční spojovací prvek byl zvolen ocelový kolík M24: [28]

- Min. rozteč mezi kolíky ve směru síly: $p_1 = 90 \text{ mm}$
- Min. rozteč mezi kolíky kolmo na sílu: $p_2 = 75 \text{ mm}$
- Min. vzdálenost od okraje ve směru síly: $e_1 = 50 \text{ mm}$
- Min. vzdálenost od okraje kolmo na sílu: $e_2 = 40 \text{ mm}$

Určené vzdálenosti a rozměry budou následně upraveny na základě minimálních hodnot, které platí pro dřevěné prvky. Vzhledem k diagonálnímu napojení příčle a stojky bude geometrie spoje lichoběžníková a z důvodu požární bezpečnosti bude ocelová deska zasahovat co nejméně k okrajům průřezu.

Ocelová deska bude posouzena pružně a pro zjednodušení nebude v rámci této práce podrobně zpracováno zatřídění průřezu. K ověření však dojde a tato skutečnost bude popsána v analytickém modelu.

Z hlediska MSÚ bude ocelová deska posouzena v tahu: [28]

- Návrhová únosnost neoslab. průřezu: $N_{t,RD} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$
- Návrhová únosnost oslabeného průřezu: $N_{u,RD} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}}$

V uvedených vztazích označuje hodnota A plochu neoslabeného průřezu styčnickové desky, f_y mez kluzu oceli, γ_{M0} a γ_{M2} součinitele vlivu materiálu, A_{net} plochu průřezu styčnickové desky oslabenou dírami a f_u mez pevnosti oceli. [28] Celkové posouzení únosnosti je pak vyjádřeno následovně:

- Posouzení MSÚ:
$$\frac{N_{ED}}{\min(N_{t,RD}; N_{u,RD})} \leq 1,0$$

Dále je nutné provést posouzení na ohyb: [28]

- Návrhová únosnost v ohybu uprostřed desky:

$$M_{el,RD} = \frac{W_{el} \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

- Návrhová únosnost v ohybu v oslabeném průřezu:

$$M_{c,RD} = \frac{W_{el,min} \times f_y}{\gamma_{M2}}$$

Hodnoty W_{el} a $W_{el,min}$ vyjadřují elastický průřezový modul styčnickové a druhá z hodnot zahrnuje rovněž oslabení průřezu, které se určí pomocí tohoto vztahu: [28]

- Průřezový modul oslabeného prvku:
$$W_{el,min} = \frac{I_{net}}{\frac{h}{2}}$$

Moment setrvačnosti I_{net} je určen se Steinerovým doplňkem a h vyjadřuje výšku průřezu ocelové desky. [28]

- Posouzení MSÚ:
$$\frac{M_{1,ED}}{M_{c,RD}} \leq 1,0, \frac{M_{2,ED}}{M_{el,RD}} \leq 1,0$$

Hodnota $M_{1,ED}$ značí maximální hodnotu samostatného ohybového momentu a $M_{2,ED}$ je hodnota uprostřed ocelové desky navýšená o vliv posouvající síly, která působí na rameně e od středu otáčení spoje. [26]

- Navýšený moment o účinek posouvající síly:
$$M_{2,ED} = M_{1,ED} + V \times e$$

Vzhledem k výrazné posouvající síle musí být průřez posouzen také na smyk: [28]

- Návrhová únosnost ve smyku:
$$V_{c,RD} = \frac{\frac{A_v \times f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

A_v značí účinnou smykovou plochu, která je v případě spoje oslabena otvory. [28]

- Posouzení MSÚ:
$$\frac{V_{ED}}{V_{c,RD}} \leq 1,0$$

V případě, že všechny uvedené posudky MSÚ vyhovují, je ocelová styčnicková deska dostačující pro přenos všech rámových sil.

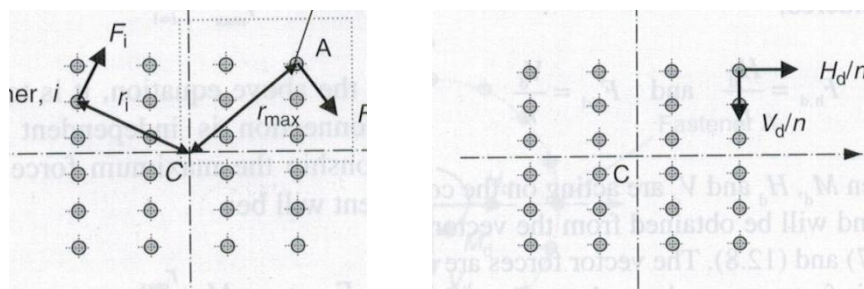
2. Dřevěné konstrukční prvky s kolíky

V principu je vyjádření únosnosti u tohoto typu styčnicku velmi podobné kruhovému rozmístění a hlavní rozdíl je v odlišné vzdálenosti spojovacích prvků od středu otáčení. V případě kruhové geometrie se jednalo o jeden nebo dva stejné poloměry, avšak u této varianty je vzdálenost u většiny odlišná a je vyjádřena pomocí souřadnic x_i a z_i . [4]

Minimální vzdálenosti a rozteče a_1 , $a_{3,t}$ a $a_{4,t}$ jsou vyjádřeny stejně jako u předchozích styčnicků (viz. 2.3.1. b). U rozmístění ocelových kolíků bude stále co nejvíce zachována symetrie a bude také nutné zohlednit minimální rozteče vyplývající z požadavků ocelové styčnickové desky. Dále je u této geometrie také nutné zohlednit rozteč kolmo na vlákna. [16]

- Minimální rozteč kolmo na vlákna: $a_2 = 3 \times d$

Počet spojovacích prvků n bude určen pouze experimentálně v pravidelném lichoběžníkovém tvaru v několika řadách a následně bude vyhodnocena únosnost. V případě nesplnění požadavků budou další řady přidány. Na základě celkového počtu prvků a určení jejich souřadnic od středu otáčení budou vyhodnoceny působící vnitřní síly následovně. [12] [26]



Obr. 26 - Působící vnitřní síly u pravoúhlého systému [2]

Rozkladem všech složek \mathbf{N} , \mathbf{V} , \mathbf{M} je opět každý dílčí prvek zatížený vodorovnou složkou, svislou složkou a tečnou silou působící kolmo na rameno od středu otáčení. [2]

- Dílčí složka normálové síly: $F_N = \frac{N}{n_{ef}}$
 - Dílčí složka posouvající síly: $F_V = \frac{V}{n_{ef}}$
 - Dílčí složka od ohybového momentu: $F_M = \frac{M}{I_p} \times \sqrt{(x_i^2 + z_i^2)}$
- $$\rightarrow F_M = \frac{M}{\frac{n_{ef}}{n} \times \sum (x_i^2 + z_i^2)} \times \sqrt{(x_i^2 + z_i^2)}$$

Po určení působících silových složek je další postup ve vyhodnocení únosnosti zcela totožný s kruhovým styčником (viz. 2.3.1. b). Spoj je však proveden v systému ocel - dřevo a charakteristická únosnost je určena následovně. [16] [11]

- Charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku (ocel - dřevo, ocelová deska libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje):

$$F_{v,Rk} = \min \left(f_{h,1,k} \times t_1 \times d, f_{h,1,k} \times t_1 \times d \times \left(\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times d \times t_1^2}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

Konečné posouzení je opět totožné jako u předchozích variant a poslední rozdílný výpočet se vyskytuje u určení smykového napětí. [4]

- Maximální posouvající síla od ohybového momentu:

$$V_M = M \times \frac{\sum 2x}{\sum (x_i^2 + z_i^2)}$$

- Smyková síla působící v místě kolíkového spoje:

$$V_D = V_M - \frac{V}{2}$$

Hodnota x vyjadřuje kolmou vzdálenost od těžiště, která vytváří rameno pro posouvající sílu. Ověření smykové únosnosti je opět totožné s předchozí analýzou (viz. 2.3.1. b).

2.3.4 Rozhodující vlivy vybraných spojů

Na základě předchozího teoretického rozboru statického působení jednotlivých typů rámových spojů budou následně vytvořeny analytické modely, ve kterých bude podrobně zkoumáno chování při změně vybraných parametrů. Z rozboru vyplývá, že nejdůležitějšími vlivy, které budou mít zásadní dopad na výslednou únosnost a tuhost spojů jsou následující proměnné parametry.

- Průměr spojovacího prvku: d
- Vzdálenost od středu otáčení: r_i resp. $x_i + z_i$
- Tloušťka vnějšího prvku: t_1
- Tloušťka vnitřního prvku: t_2

Jako proměnné hodnoty, které mohou ovlivnit návrh spoje a jeho únosnost, byly dále vyhodnoceny charakteristická pevnost spoje v tahu $f_{u,k}$ a charakteristická hustota dřeva ρ_k . V rámci zkoumání únosnosti však tyto materiálové charakteristiky zůstanou konstantní o standardních hodnotách. Zlepšení materiálových vlastností bude využito až při následné optimalizaci. Stejně tak bude určeno neměnné konstrukční řešení, aby bylo možné jednotlivé spoje porovnat.

3. Analytické modely vybraných spojů

3.1 Vybrané konstrukční řešení

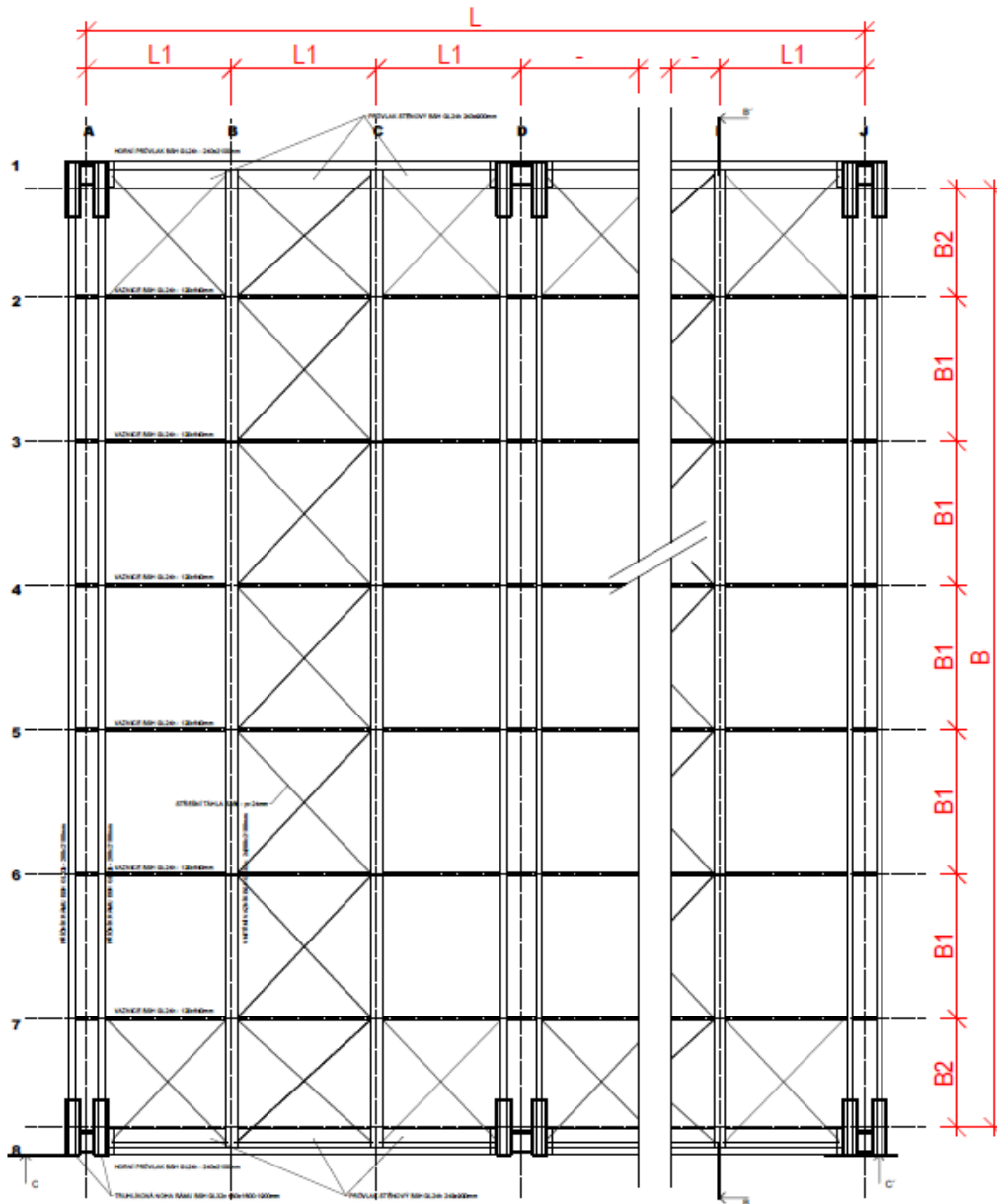
Pro účely analytického rozboru, vytvoření parametrických modelů a následnou optimalizaci konstrukčního řešení byl vybrán stávající objekt sportovní haly v Sušici, který odpovídá svým provedením řešené problematice.

3.1.1 Geometrie konstrukčního řešení

Hala je tvořena dvoukloubovým rámem z lepeného lamelového dřeva o pevnostní třídě GL32c. Rozpětí rámu činní osově 32,5 m, osová výška 13,55 m a spoj v rámovém rohu je tvořen kruhovým šroubovaným spojem o více řadách. Modul rámu v

daném halovém objektu je 5 m, což je hodnota zatěžovací šířky. Vzhledem k podezření na neekonomický návrh bude u tohoto objektu proveden bližší rozbor.

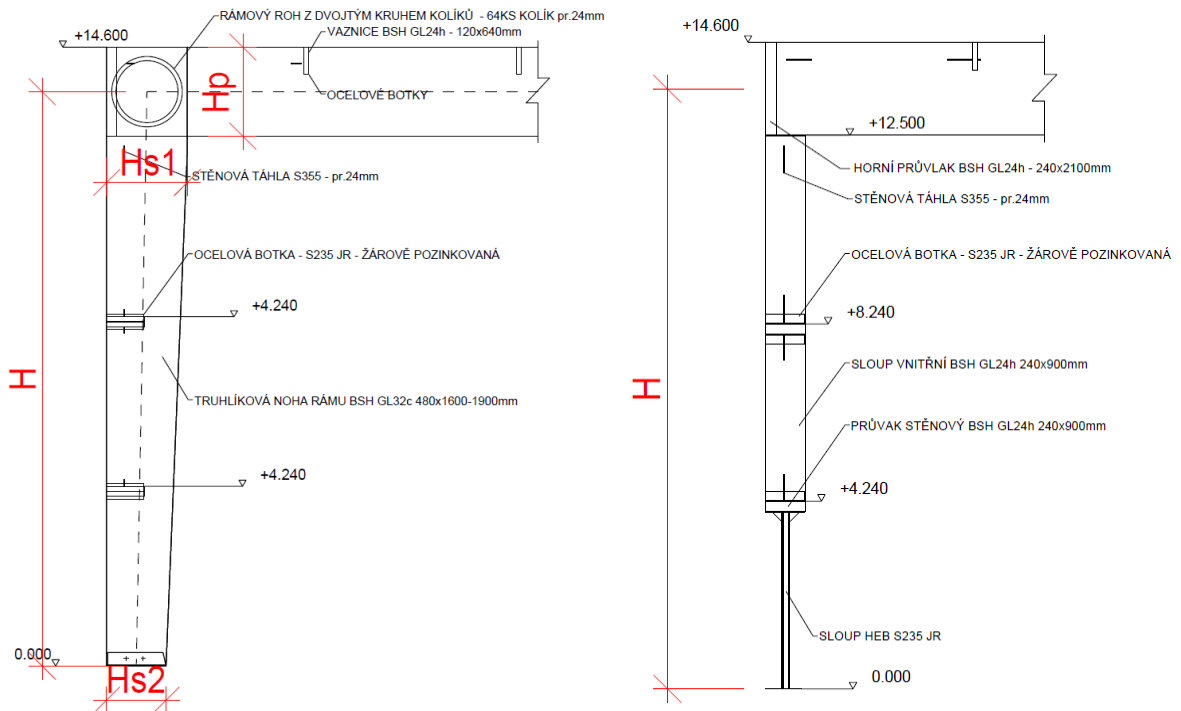
a) Půdorysné rozměry



Obr. 27 - Sportovní hala v Sušici - Půdorys

- Půdorysná osová délka haly: **$L = 45\text{ m}$**
- Půdorysná osová šířka haly: **$B = 32,5\text{ m}$**
- Modulová vzdálenost rámců: **$L_1 = 5\text{ m}$**
- Modulová vzdálenost vnitřních polí: **$B_1 = 5\text{ m}$**
- Modulová vzdálenost vnějších polí: **$B_2 = 3,75\text{ m}$**

b) Řezy

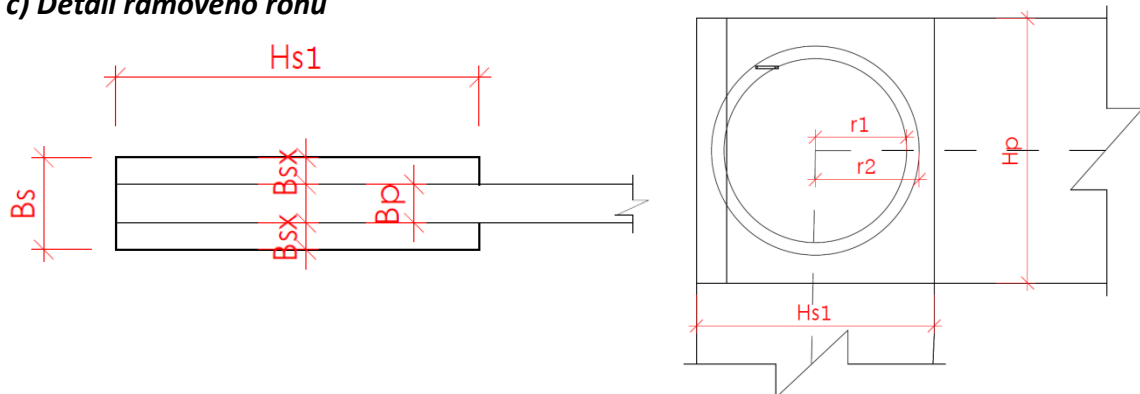


Obr. 28 - Sportovní hala v Sušici: Řez hlavním rámem (vlevo), Řez vedlejším kloubovým rámem (vpravo)

Z hlediska analýzy je z obou uvedených ráků potřebná pouze levá varianta s kruhovým šroubovaným spojem. U druhého typu se jedná o kloubové uložení, které nepřenáší ohybový moment.

- Osová výška haly: $H = 13,55 \text{ m}$
- Výška průřezu rákové stojky v hlavě: $H_{s1} = 1,9 \text{ m}$
- Výška průřezu rákové stojky v patě: $H_{s2} = 1,4 \text{ m}$
- Výška průřezu rákové příčle: $H_p = 2,1 \text{ m}$

c) Detail ráového rohu



Obr. 29 - Sportovní hala v Sušici: Detail 1 - půdorys (vlevo), Detail 2 - řez (vpravo)

- Šířka rámové stojky: $B_s = 0,48 \text{ m}$
- Šířka rámové příčle: $B_p = 0,2 \text{ m}$
- Šířka zúžené rámové stojky: $B_{sx} = 0,14 \text{ m}$
- Poloměr vnějšího kruhu spojovacích prvků: $B_1 = 0,83 \text{ m}$
- Poloměr vnitřního kruhu spojovacích prvků: $B_2 = 0,73 \text{ m}$

Jako spojovací prostředek byly použity ocelové kolíky o průměru M24. Dle dříve provedeného rozboru není splněna minimální vzdálenost mezi vnějším a vnitřním kruhem a_1 a toto řešení tedy není v souladu s normou. Pro další analýzu a návrh nebude toto geometrické rozmístění bráno v potaz.

Ostatní konstrukční prvky jako vaznice, paždíky atd., jsou navrženy v pevnostní třídě GL24h a jejich rozměry budou specifikovány ve výpočtu zatížení.

3.1.2 Zatížení

Uvedené rámy s kruhovým styčником jsou u daného konstrukčního řešení navrženy jako dvojice v modulu 15 m a společně působí na zatěžovací šířce 5 m. V této diplomové práci bude však pro analytický rozbor a parametrické modely uvažováno pouze s jednou rámovou konstrukcí. Tímto bude zajištěna větší přehlednost a znázorněno standardně používané provedení.

a) Stálé zatížení (G)

Pro přehlednost bude provedeno rozdělení na specifikaci vznikajících zatížení a výpočet jejich celkové charakteristické a návrhové hodnoty.

1. Specifikace stálého zatížení [17] [29]

1. Vlastní tíha rámové konstrukce: **Automatický výpočet v softwaru Scia engineer 17.1**
2. Vlastní tíha vaznic GL24h: $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$, $b = 120 \text{ mm}$, $h = 640 \text{ mm}$
3. Vlastní tíha horního průvzlaku GL24h: $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$, $b = 240 \text{ mm}$, $h = 2100 \text{ mm}$
4. Vlastní tíha stěnového průvzlaku GL24h: $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$, $b = 900 \text{ mm}$, $h = 240 \text{ mm}$
5. Zatížení od střešních panelů (sendvičový izolační panel PUR, $U = 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $d = 120 \text{ mm}$): $m = 13,4 \text{ kg/m}^2$ [X]
6. Zatížení od stěnových panelů (sendvičový izolační panel PUR, $U = 0,19 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $d = 120 \text{ mm}$): $m = 13,5 \text{ kg/m}^2$ [X]

Pro zohlednění zatížení od obvodového pláště byl zvolen typizovaný systém sendvičových panelů od výrobce Halové systémy s.r.o. a veškeré hodnoty byly převzaty z podkladů, které výrobce volně poskytuje. U vybraného konstrukčního řešení je však navržen rozpon 5 m, což je téměř neproveditelné vzhledem k působícímu zatížení na jednotlivé panely. Úprava modulu vaznic bude provedena až ve fázi optimalizace rámu.

2. Výpočet stálého zatížení [29]

Typ zatížení	Charakteristická hodnota g_k	γ_Q	Návrhová hodnota g_d
1.	–	1,35	–
2.	$\rho_k \times b \times h \times L_1 = 380 \times 0,12 \times 0,64 \times 5 = 1,46 \text{ kN}$	1,35	$1,35 \times 1,46 = 1,97 \text{ kN}$
3.	$\rho_k \times b \times h \times L_1 = 380 \times 0,24 \times 2,1 \times 5 = 9,58 \text{ kN}$	1,35	$1,35 \times 9,58 = 12,93 \text{ kN}$
4.	$\rho_k \times b \times h \times L_1 = 380 \times 0,9 \times 0,24 \times 5 = 4,1 \text{ kN}$	1,35	$1,35 \times 4,1 = 5,53 \text{ kN}$
5.	$m \times L_1 = 13,4 \times 5 = 0,67 \text{ kN/m}$	1,35	$1,35 \times 0,67 = 0,90 \text{ kN/m}$
6.	$m \times L_1 = 13,5 \times 5 = 0,68 \text{ kN/m}$	1,35	$1,35 \times 0,68 = 0,92 \text{ kN/m}$

Tab. 1 - Stálé zatížení

b) Užitné zatížení (Q) [29]

Vzhledem k tomu, že střecha sportovní haly není pochozí, je počítáno s užitným zatížením pouze pro účely dočasné údržby. Tato hodnota se uvažuje samostatně a není kombinována se zatížením sněhem nebo větrem. [29]

Typ zatížení	Charakteristická hodnota g_k	γ_Q	Návrhová hodnota g_d
Střechy nepřístupné s výjimkou běžné údržby a oprav, kategorie H, dle ČSN	$m \times L_1 = 0,75 \times 5 = 3,75 \text{ kN/m}$	1,5	$1,5 \times 3,75 = 5,63 \text{ kN/m}$

Tab. 2 - Užitné zatížení

c) Zatížení sněhem (S_N) [30]

Jedná se o halový objekt v Sušici, kde je sněhová oblast charakterizována stupněm II. Stavba leží v normálním typu krajiny a její střešní konstrukce je navržena pod minimálním sklonem z materiálu, který neumožňuje nárazová odtávání sněhu

vlivem tepelné propustnosti. Z této charakteristiky vyplývají dle ČSN následující výpočtové parametry pro určení hodnoty zatížení sněhem. [30]

Charakteristická hodnota zatížení sněhem pro návrh se určí následovně. [30]

$$S = \mu_i \times C_e \times C_t \times S_k = 0,8 \times 1 \times 1 \times 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

- Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi: $S_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$
- Součinitel expozice: $C_e = 1,0$
- Tepelný součinitel: $C_t = 1,0$
- Tvarový součinitel zatížení sněhem: $\mu_i = 0,8$

Typ zatížení	Charakteristická hodnota g_k	γ_Q	Návrhová hodnota g_d
Zatížení sněhem	$S \times L_1 = 0,8 \times 5 = 4,0 \text{ kN/m}$	1,5	$1,5 \times 4,0 = 6,0 \text{ kN/m}$

Tab. 3 - Zatížení sněhem

d) Zatížení větrem [31]

Dle mapy větrných oblastí se sportovní hala v Sušici nachází v II kategorii, kde je stanovena rychlost větru na hodnotu 25 m/s. Dále byla zařazena do kategorie terénu číslo II, což je oblast s nízkou vegetací a větší vzdáleností překážek. [31] Podle ČSN je zatížení větrem určeno následovně. [31]

$$\text{Základní rychlost větru: [31]} \quad v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0} = 1 \times 1 \times 25 = 25 \text{ m/s}$$

- Výchozí základní rychlost větru: $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$
- Součinitel směru větru: $C_{dir} = 1,0$
- Součinitel ročního období: $C_{season} = 1,0$

$$\text{Základní dynamický tlak větru: [31]} \quad q_b = 0,5 \times \rho \times v_b^2 = 0,5 \times 1,25 \times 25^2 = 390,63 \text{ kg/m s}$$

- Měrná hmotnost vzduchu: $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

$$\text{Maximální dynamický tlak: [31]} \quad q_p(z) = c_e(z) \times q_b = 2,65 \times 390,63 = 1,035 \text{ kN/m}^2$$

- Součinitel expozice: $c_e(z) = 2,65$ (dle grafu ČSN EN 1991-1-4)

V dalším kroku budou určeny jednotlivé hodnoty tlaku po obvodu konstrukce na základě součinitele vnějšího tlaku c_{pe} a tento proces se musí rozlišit pro vítr působící v podélném a příčném směru. Dílčí velikosti vnějšího tlaku jsou vyjádřeny podle následujícího vzorce. [31]

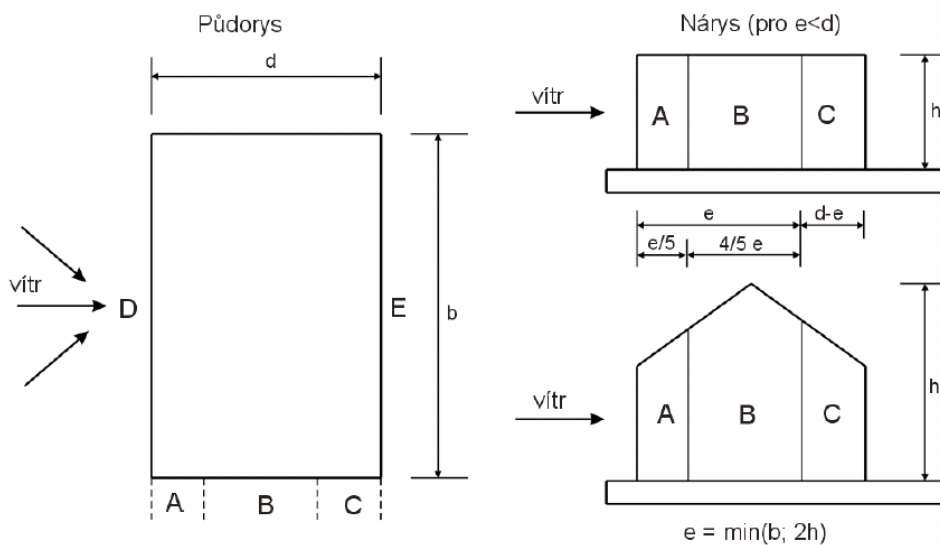
Tlak větru na vnější povrchy: [31] $w_e = q_p(z) \times C_{pe}$

- Součinitel vnějšího tlaku: $C_{pe} =$

Oblast	A		B		C		D		E	
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
< 0,25	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

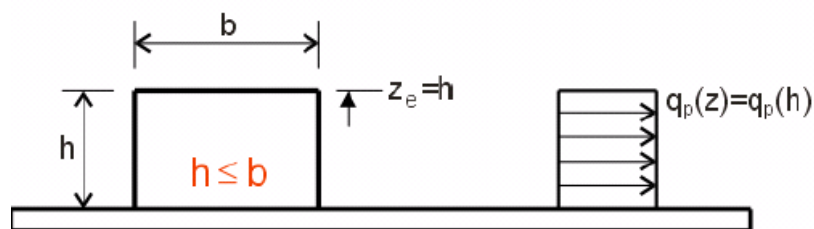
Obr. 30 - Součinitele vnějšího tlaku pro svislé stěny budov s pravoúhlým půdorysem [31]

Rozdělení ploch se řídí podle následujícího schématu. [31]



Obr. 31 - Označení ploch u svislých stěn [31]

Dále je nutné rozlišit tlak větru po výšce stěny. Avšak v případě, že platí $h \leq b$, je průběh tlaku po výšce konstantní. [31]



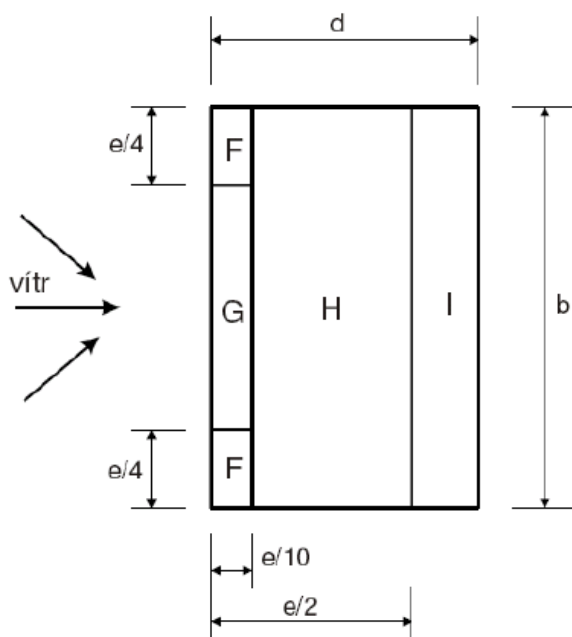
Obr. 32 - Rozdělení tlaku po výšce stěny [31]

Tlak větru působící na střechu objektu je rozdělen podle řešení obvodových hran. Pro provedení s ostrými hranami platí tyto hodnoty C_{pe} . [31]

Typ ploché střechy	Oblast							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Ostré hrany	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2

Obr. 33- Součinitele vnějšího tlaku pro ploché střechy [31]

Rozdělení ploch na střeše je následovné. [31]



Obr. 34- Rozdělení tlaku u plochých střech [31]

1. Vítr příčný ($V_{př}$)

Jako vítr příčný se označuje působení zatížení kolmo na delší stranu objektu. Pro správné určení hodnot tlaku je nutné určit základní délkové hodnoty a ověřit stanovené podmínky. [31]

- Hodnota d: $d = 32,5 \text{ m}$
- Hodnota e: $e = \min (b, 2 \times h) = \min (45, 27,1) = 27,1 \text{ m}$
- Hodnota h/d: $h / d = 13,55 / 32,5 = 0,42$

Vzhledem k mezilehlé hodnotě poměru h/d je nutné v některých případech součinitel tlaku větru interpolovat. Dále bylo ověřeno, že platí $e < d$ a může být tedy použito výše uvedené schéma pro rozdělení ploch. [31]

	$c_{pe,10}$	$q_p(z)$	w_e	q_k	L
A	-1,2	1,035 kN/m ²	-1,24 kN/m ²	5 x -1,24 = -6,2 kN/m	5,4 m
B	-0,8	1,035 kN/m ²	-0,83 kN/m ²	5 x -0,83 = -4,15 kN/m	21,7 m
C	-0,5	1,035 kN/m ²	-0,52 kN/m ²	5 x -0,52 = -2,6 kN/m	5,4 m
D	+0,75	1,035 kN/m ²	0,78 kN/m ²	5 x 0,78 = +3,9 kN/m	45 m
E	-0,4	1,035 kN/m ²	-0,41 kN/m ²	5 x -0,41 = -2,1 kN/m	45 m
F	-1,8	1,035 kN/m ²	-1,86 kN/m ²	5 x -1,86 = -9,3 kN/m	6,8 m
G	-1,2	1,035 kN/m ²	-1,24 kN/m ²	5 x -1,24 = -6,2 kN/m	31,4 m
H	-0,7	1,035 kN/m ²	-0,72 kN/m ²	5 x -0,72 = -3,5 kN/m	10,8 m
I	+0,2	1,035 kN/m ²	+0,21 kN/m ²	5 x +0,21 = -1,0 kN/m	19,0 m

Tab. 4 - Vítr příčný

Hodnota q_k značí charakteristické zatížení větrem vynásobené zatěžovací šířkou rámu a udává velikost na běžný metr. L je délka úseku dle normy pro jednotlivé plochy A - I.

2. Vítr podélný (V_{po})

Vítr podélný působí v opačném směru kolmo na kratší stranu objektu. Postup pro vyhodnocení zatížení je však zcela totožný jako v předchozím případě. [31]

- Hodnota d : $d = 45 \text{ m}$
- Hodnota e : $e = \min(b, 2 \times h) = \min(32,5, 29,9) = 29,9 \text{ m}$
- Hodnota h/d : $h/d = 14,95 / 45 = 0,33$

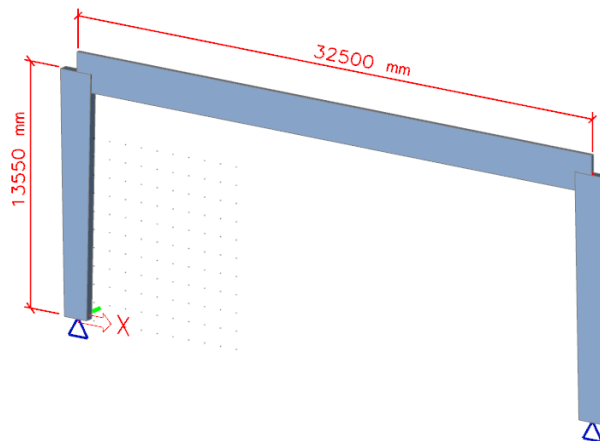
	$c_{pe,10}$	$q_p(z)$	w_e	q_x	L
A	-1,2	1,035 kN/m ²	-1,24 kN/m ²	5 x -1,24 = -6,2 kN/m	6,0 m
B	-0,8	1,035 kN/m ²	-0,83 kN/m ²	5 x -0,83 = -4,15 kN/m	23,9 m
C	-0,5	1,035 kN/m ²	-0,52 kN/m ²	5 x -0,52 = -2,6 kN/m	15,1 m
D	+0,75	1,035 kN/m ²	0,78 kN/m ²	5 x 0,78 = +3,9 kN/m	32,5 m
E	-0,35	1,035 kN/m ²	-0,36 kN/m ²	5 x -0,41 = -1,8 kN/m	32,5 m
F	-1,8	1,035 kN/m ²	-1,86 kN/m ²	5 x -1,86 = -9,3 kN/m	7,5 m
G	-1,2	1,035 kN/m ²	-1,24 kN/m ²	5 x -1,24 = -6,2 kN/m	17,5 m
H	-0,7	1,035 kN/m ²	-0,72 kN/m ²	5 x -0,72 = -3,5 kN/m	12,0 m
I	+0,2	1,035 kN/m ²	+0,21 kN/m ²	5 x +0,21 = -1,0 kN/m	30,0 m

Tab. 5 - Vítr podélný

Veškeré vyhodnocené zatížení bude následně použito v numerickém modelu a budou vyhodnoceny kombinace dle ČSN. Maximální hodnoty poté budou sloužit jako referenční pro analytické a parametrické modely.

3.1.3 Vyhodnocení vnitřních sil

Zvolené konstrukční řešení bylo vymodelováno v softwaru Scia engineer 17.1 v odpovídajících rozměrech a materiálovém provedení GL32c. Rámový roh byl uvažován jako tuhý a prozatím nebyl použit pružný kloub k simulaci polotuhého spoje.

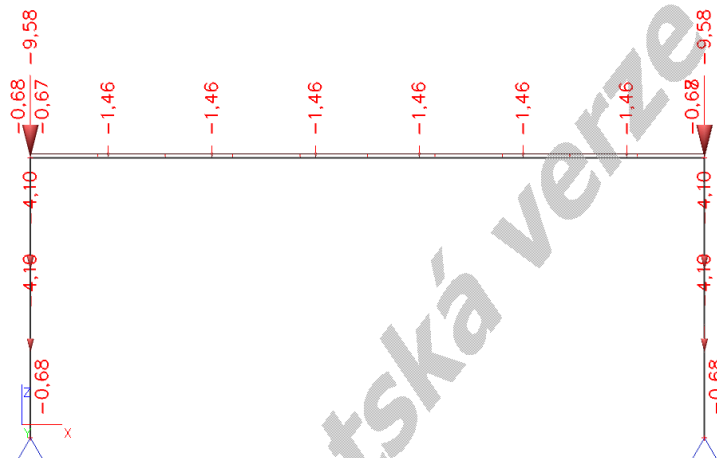


Obr. 35- Model vybraného konstrukčního řešení

Dále bylo do modelu doplněno veškeré vyhodnocené zatížení. V rámci této práce budou však uvedeny jen některé zatěžovací stavy a to ty rozhodující.

a) Vykreslení zatížení

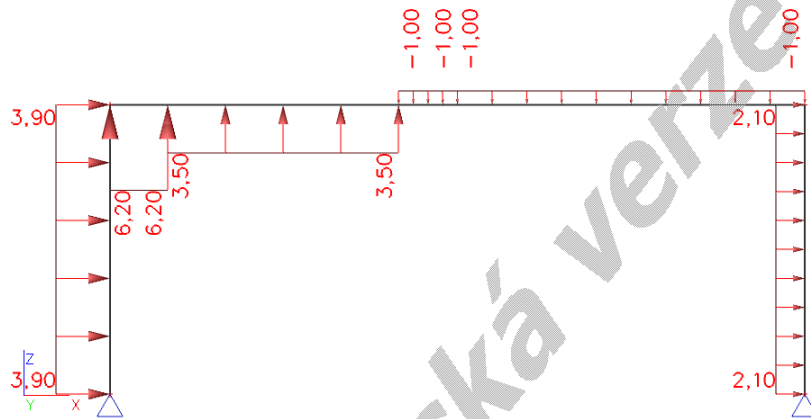
- STÁLÉ ZATÍŽENÍ:



Obr. 36- Vykreslení stálého zatížení

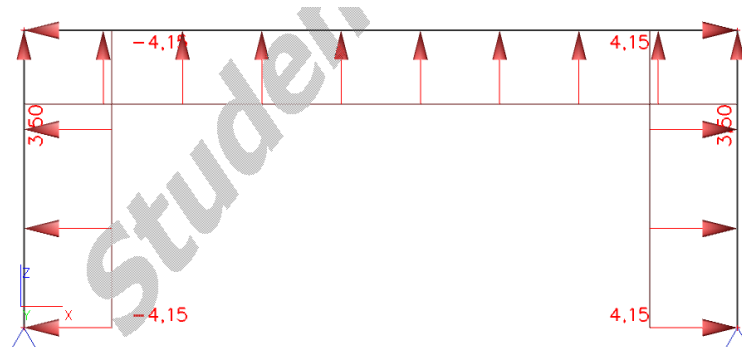
Dále bylo vykresleno zatížení užité a zatížení sněhem, kde se však jedná pouze o spojité zatížení působící kolmo na střešní konstrukci. Pro zjednodušení zde tento grafický výstup nebude uveden.

- ZATÍŽENÍ VĚTREM - VÍTR PŘÍČNÝ:



Obr. 37- Vykreslení zatížení větrem - vítr příčný

- ZATÍŽENÍ VĚTREM - VÍTR PODÉLNÝ:



Obr. 38- Vykreslení zatížení větrem - vítr podélný

b) Kombinace

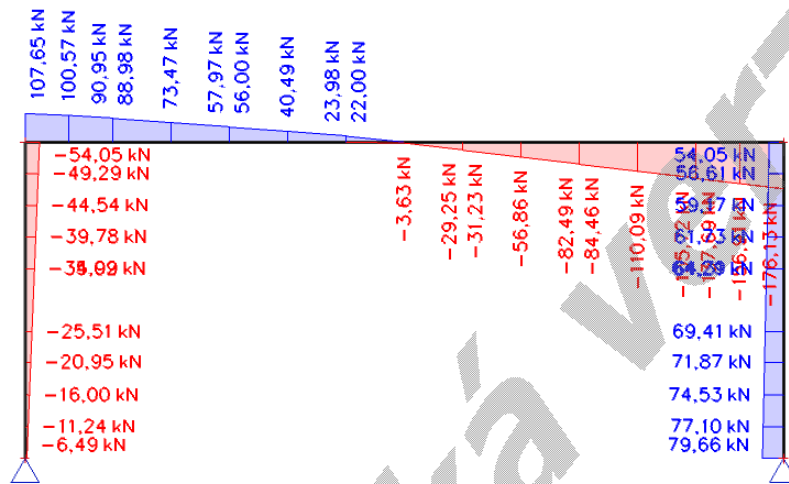
Kombinace zatížení se určují dle ČSN EN 1990 na základě následujícího vzorce, který platí pro mezní stav únosnosti. Mezní stav použitelnosti bude posouzen až při optimalizaci celého rámu. [32]

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Obr. 39- Kombinační vzorec pro MSÚ [32]

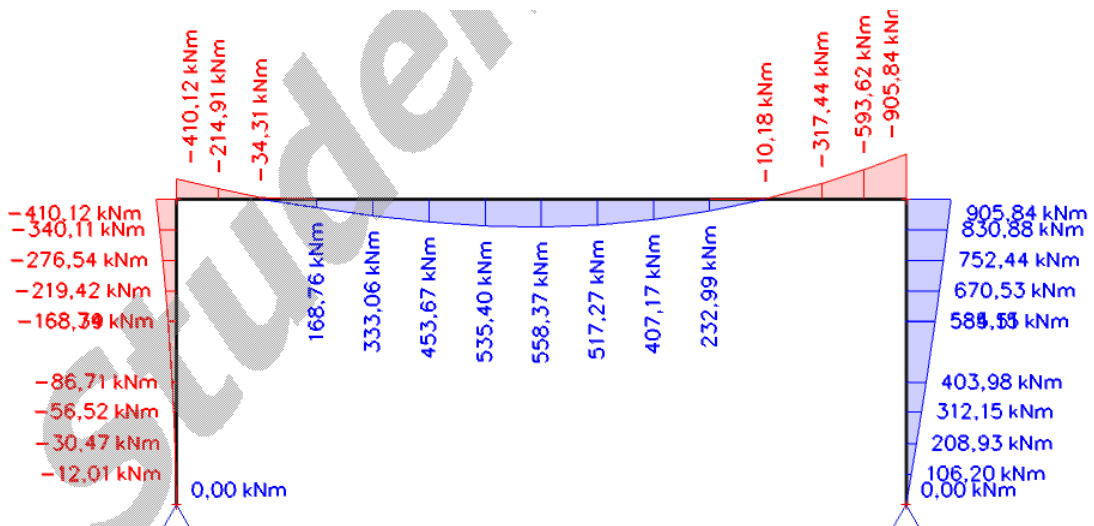
Hodnoty $\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,5$ a vyjadřují dílčí součinitele pro stálé a proměnné zatížení za nepříznivého působení. G_k a Q_k značí charakteristické hodnoty zatížení a ψ_0

- POSOUVAJÍCÍ SÍLA V :



Obr. 40- Vykreslení vnitřních sil - posouvající síla

- OHYBOVÝ MOMENT M :



Obr. 41- Vykreslení vnitřních sil - ohybový moment

Na základě tohoto vyhodnocení bude dále možné provést analýzu únosnosti a zabývat se podrobněji jednotlivými vlivy a nejdůležitějšími parametry. V rámci následujících modelů budou použity pouze tyto hodnoty vnitřních sil a rozměry rámové konstrukce. Proměnným faktorem budou pouze geometrické parametry v místě spoje a nebudou se měnit ani materiálové charakteristiky. Celkové optimalizace bude provedena až v závěru této práce.

3.2 Analytické modely

K určení vlivu již dříve vyhodnocených parametrů byl vytvořen analytický model v softwaru Microsoft Office Excel 2007, který je nastaven tak, aby se při změně proměnné automaticky přepočítaly hodnoty únosnosti. Tímto způsobem budou porovnány parametry d , r_i , t_1 a t_2 u vybraných rámových rohů (viz. 2.3.4.).

3.2.1 Kruhový šroubovaný styčník

a) Výpočetní model

Analytický model je nastaven na použití maximálního počtu spojovacích prvků na co největším rameni od středu otáčení. Pro spoj jsou použity ocelové kolíky třídy pevnosti 4.6 a dřevěné konstrukční prvky v pevnostní třídě GL32c, jejichž geometrie odpovídá vybranému konstrukčnímu řešení. Ostatní hodnoty jsou nastaveny jako proměnné a budou předmětem analýzy.

Výpočet únosnosti jako takový je nastaven zvláště na samostatný posudek působení v rámové stojce a v rámové příčli. U obou konstrukčních prvků se vyskytují odlišné hodnoty vnitřních sil a je tedy nutné provést komplexní ověření styčníku. Z toho důvodu je celý model rozdělen na dvě samostatné části, které kromě ověření únosnosti dvojstřížného spoje zahrnují také posouzení maximálního smykového napětí.

Model je dále také nastaven pro využití řešení víceřadého šroubovaného styčníku a jsou v něm již zahrnuty funkce pro vytvoření geometrie vnitřního kruhu a efektivní účinnost spojovacích prvků. Ty jsou však v tomto případě nastaveny tak, aby nebyly do celkové analýzy zahrnuty a budou využity až u následující varianty.

Z důvodu velkého rozsahu bude grafický výstup modelu generován pouze jednou s použitím ocelových kolíků M24. Další vyhodnocení bude znázorněno pouze v přehledné tabulce. Kromě podrobného výpisu výpočtových hodnot obsahuje model také popis všech veličin, jejich normovou hodnotu nebo výpočetní vzorec. Vypracování bylo provedeno na základě norem ČSN EN 1995-1-1 a DIN 1052. [16] [17]

Hlavním cílem této analýzy je ověření předpokladu, že únosnost zásadně závisí na předem vybraných parametrech a na základě tohoto ověření budou zjištěné vlivy využity v navazující optimalizaci rámové konstrukce.

ANALYTICKÝ MODEL KRUHOVÉHO ŠROUBOVANÉHO STYČNÍKU:

Hodnoty vnitřních sil:

Ohybový moment:	$M =$	905,84	kNm
Normálová síla v příčli:	$N,p =$	54,05	kN
Normálová síla ve sloupu:	$N,s =$	189,06	kN
Posouvající síla v příčli:	$V,p =$	176,13	kN
Posouvající síla ve sloupu:	$V,s =$	54,05	kN
Výška příčle:	$H,p =$	2,1	m
Výška stojky:	$H,s =$	1,9	m

Rozhodující proměnné parametry:

Tloušťka stojky:	$t,1 =$	0,14	m
Tloušťka příčle:	$t,2 =$	0,2	m
Poloměr vnějšího kruhu:	$r,1 =$	0,782	m
Poloměr vnitřního kruhu:	$r,2 =$	0	m
Průměr kolíku:	$d =$	0,024	m
Charakteristická pevnost kolíku v tahu:	$f,u,k =$	400	MPa
Charakteristická hustota dřeva:	$\rho,k =$	410	kg/m ³ (GL32c)
Sklon příčle:	$\gamma =$	0	°

Geometrie spoje:

$a,1 =$	$(3 + 2 \times (\cos \alpha)) \times d =$	0,12	m	(minimální rozeč mezi kolíky)
$a,3,t =$	$\max(7 \times d; 80 \text{ mm}) =$	0,168	m	(minimální vzdálenost od okraje)
$a,min =$	$6 \times d$	0,144	m	(minimální oblouková vzdálenost mezi kolíky)
$r,1,max =$	$\min(B,p - a,3,t \times 2; B,s - a,3,t \times 2) / 2 =$	0,782	m	(maximální vnější poloměr)
$r,2,max =$	$r,1,max - a,1 =$	0,662	m	(maximální vnitřní poloměr)

Počet kolíků:

$n,1 =$	$(2 \times \pi \times r,1 / a,min) =$	34	ks	(maximální vnější počet kolíků)
$n,2 =$	$(2 \times \pi \times r,2 / a,min) =$	0	ks	(maximální vnitřní počet kolíků)
$n,ef =$	$0,85 \times (n,1 + n,2) =$	1,00	-	(redukce efektivního počtu kolíků)

Vnitřní síly působící na kolík vE stojce:

$F,m =$	$M \times (r,1 / (n,1 \times r,1^2 + n,2 \times r,2^2)) =$	33,95	kN	(tečná síla vyvolaná ohybovým momentem působící na jeden kolík)
$F,n =$	$N / (n,1 + n,2) =$	5,54	kN	(normálová síla působící na jeden kolík)
$F,v =$	$V / (n,1 + n,2) =$	1,58	kN	(posouvající síla působící na jeden kolík)
$V,m =$	$(M / \tau_0 \times ((n,1 \times r,1 + n,2 \times r,2) / (n,1 \times r,1^2 + n,2 \times r,2^2))) =$	368,73	kN	(maximální posouvající síla od ohybového momentu)
$V,d =$	$V,m - V,s/2 =$	341,70	kN	(smyková síla působící v místě kolíkového spoje)

Vnitřní síly působící na kolík v příčli:

$F,m =$	$M \times (r,1 / (n,1 \times r,1^2 + n,2 \times r,2^2)) =$	33,95	kN	(tečná síla vyvolaná ohybovým momentem působící na jeden kolík)
$F,n =$	$N / (n,1 + n,2) =$	1,58	kN	(normálová síla působící na jeden kolík)
$F,v =$	$V / (n,1 + n,2) =$	5,16	kN	(posouvající síla působící na jeden kolík)
$V,m =$	$(M / \tau_0 \times ((n,1 \times r,1 + n,2 \times r,2) / (n,1 \times r,1^2 + n,2 \times r,2^2))) =$	368,73	kN	(maximální posouvající síla od ohybového momentu)
$V,d =$	$V,m - V,p/2 =$	280,66	kN	(smyková síla působící v místě kolíkového spoje)

Vyjádření minimální únosnosti spojovacího prvku:

$M,y,Rk =$	$0,3 \times f,u,k \times d^2,6 =$	465297,24	Nmm	(charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti)
$f,h,0,k =$	$0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho,k =$	25,55	MPa	(charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny)
$k,90 =$	$1,35 + 0,015 \times d =$	1,71	-	(součinitel pro zohlednění typu dřeva - LLD)
$k,mod =$		0,80	-	(modifikační součinitel - Třída provozu 1, Střednědobé zatížení, LLD)
$\gamma,M =$		1,25	-	(součinitel pro vlastnosti materiálu a únosnosti - LLD)
$f,v,k =$		3,20	MPa	(charakteristická pevnost ve smyku)
$f,v,d =$	$k,mod \times (f,v,k / \gamma,M) =$	2,05	MPa	(návrhová pevnost ve smyku)

Obr. 42- Kruhový šroubovaný styčník - Proměnné parametry a výpočet vnitřních sil

Rozložení vnitřní síly od $F_{m,n}$ pro jednotlivé kolíky a vyjádření celkové výslednice:

Pořadí prvku n	RÁMOVÁ STOJKA										RÁMOVÁ PŘÍČEL									
	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken β (deg)	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken β (rad)	Normálová složka $F_{m,n}$ (kN)	Posouvající složka $F_{m,n}$ (kN)	Výslednice síly $F_{r,d}$ (kN)	Celkový úhel od směru vláken α (rad)	Celkový úhel od směru vláken α (deg)	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken δ (deg)	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken δ (rad)	Normálová složka $F_{m,n}$ (kN)	Posouvající složka $F_{m,n}$ (kN)	Výslednice síly $F_{r,d}$ (kN)	Celkový úhel od směru vláken α (rad)	Celkový úhel od směru vláken α (deg)						
0	90,00	1,57	0,00	33,95	35,96	1,42	81,14	0,00	0,00	33,95	0,00	35,91	0,14	8,27						
1	79,41	1,39	-6,24	33,37	34,96	-1,55	-88,86	10,59	0,18	33,37	-6,24	34,97	-0,03	-1,76						
2	68,82	1,20	-12,27	31,66	33,91	-1,37	-78,57	21,18	0,37	31,66	-12,26	33,99	-0,21	-12,06						
3	58,24	1,02	-17,87	28,86	32,85	-1,19	-67,95	31,76	0,55	28,86	-17,87	32,99	-0,40	-22,66						
4	47,65	0,83	-22,87	25,09	31,81	-0,99	-56,99	42,35	0,74	25,09	-22,87	32,02	-0,59	-33,58						
5	37,06	0,65	-27,09	20,46	30,83	-0,80	-45,65	52,94	0,92	20,46	-27,09	31,09	-0,78	-44,85						
6	26,47	0,46	-30,39	15,13	29,95	-0,59	-33,93	63,53	1,11	15,13	-30,39	30,26	-0,99	-56,47						
7	15,88	0,28	-32,65	9,29	29,21	-0,38	-21,86	74,12	1,29	9,29	-32,65	29,56	-1,19	-68,42						
8	5,29	0,09	-33,80	3,13	28,65	-0,17	-9,47	84,71	1,48	3,13	-33,80	29,03	-1,41	-80,65						
9	5,29	0,09	-33,80	-3,13	28,31	0,05	3,14	84,71	1,48	-3,13	-33,80	28,68	1,52	86,91						
10	15,88	0,28	-32,65	-9,29	28,19	0,28	15,87	74,12	1,29	-9,29	-32,65	28,55	1,30	74,34						
11	26,47	0,46	-30,39	-15,13	28,30	0,50	28,60	63,53	1,11	-15,13	-30,39	28,64	1,08	61,76						
12	37,06	0,65	-27,09	-20,46	28,65	0,72	41,21	52,94	0,92	-20,46	-27,09	28,93	0,86	49,28						
13	47,65	0,83	-22,87	-25,09	29,20	0,94	53,60	42,35	0,74	-25,09	-22,87	29,43	0,65	37,00						
14	58,24	1,02	-17,87	-28,86	29,94	1,15	65,68	31,76	0,55	-28,86	-17,87	30,10	0,44	24,98						
15	68,82	1,20	-12,27	-31,66	30,82	1,35	77,40	21,18	0,37	-31,66	-12,26	30,90	0,23	13,29						
16	79,41	1,39	-6,24	-33,37	31,79	1,55	88,74	10,59	0,18	-33,37	-6,24	31,81	0,03	1,94						
17	90,00	1,57	0,00	-33,95	32,84	-1,40	-80,29	0,00	0,00	-33,95	0,00	32,77	-0,16	-9,06						
18	79,41	1,39	6,24	-33,37	33,90	-1,22	-69,67	10,59	0,18	-33,37	6,24	33,77	-0,34	-19,73						
19	68,82	1,20	12,27	-31,66	34,95	-1,04	-59,37	21,18	0,37	-31,66	12,26	34,76	-0,53	-30,09						
20	58,24	1,02	17,87	-28,86	35,95	-0,86	-49,36	31,76	0,55	-28,86	17,87	35,70	-0,70	-40,18						
21	47,65	0,83	22,87	-25,09	36,88	-0,69	-39,60	42,35	0,74	-25,09	22,87	36,58	-0,87	-50,02						
22	37,06	0,65	27,09	-20,46	37,70	-0,52	-30,04	52,94	0,92	-20,46	27,09	37,37	-1,04	-59,66						
23	26,47	0,46	30,39	-15,13	38,40	-0,36	-20,66	63,53	1,11	-15,13	30,39	38,05	-1,21	-69,14						
24	15,88	0,28	32,65	-9,29	38,96	-0,20	-11,41	74,12	1,29	-9,29	32,65	38,59	-1,37	-78,48						
25	5,29	0,09	33,80	-3,13	39,38	-0,04	-2,25	84,71	1,48	-3,13	33,80	39,00	-1,53	-87,72						
26	5,29	0,09	33,80	3,13	39,63	0,12	6,84	84,71	1,48	3,13	33,80	39,25	1,45	83,10						
27	15,88	0,28	32,65	9,29	39,71	0,28	15,89	74,12	1,29	9,29	32,65	39,35	1,29	73,96						
28	26,47	0,46	30,39	15,13	39,63	0,44	24,95	63,53	1,11	15,13	30,39	39,29	1,13	64,82						
29	37,06	0,65	27,09	20,46	39,38	0,59	34,04	52,94	0,92	20,46	27,09	39,07	0,97	55,65						
30	47,65	0,83	22,87	25,09	38,97	0,75	43,19	42,35	0,74	25,09	22,87	38,70	0,81	46,42						
31	58,24	1,02	17,87	28,86	38,41	0,92	52,44	31,76	0,55	28,86	17,87	38,18	0,65	37,11						
32	68,82	1,20	12,27	31,66	37,71	1,08	61,83	21,18	0,37	31,66	12,26	37,53	0,48	27,67						
33	79,41	1,39	6,24	33,37	36,89	1,25	71,38	10,59	0,18	33,37	6,24	36,77	0,32	18,06						
34	90,00	1,57	0,00	33,95	35,96	1,42	81,14	0,00	0,00	33,95	0,00	35,91	0,14	8,27						

$$F_{m,n} \cdot \sin(\beta) = F_{m,n} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) = F_{m,n} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) = F_{m,n} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta)$$

$$F_{m,n} \cdot \cos(\beta) = F_{m,n} \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\beta) = F_{m,n} \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\beta) = F_{m,n} \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\beta)$$

$$\beta = 90 - \arctan(F_{m,n} / F_{r,d})$$

$$F_{r,d} = \sqrt{(F_{m,n} \cdot \sin(\beta))^2 + (F_{m,n} \cdot \cos(\beta))^2}$$

$$\arctan \alpha = \arctan(F_{m,n} \cdot \sin(\beta) / (F_{m,n} \cdot \cos(\beta)))$$

Obr. 43- Kruhový šroubovaný styčník - Výpočet výslednice sil a úhlu od směru vláken

RÁMOVÁ STOJKA

Pořadí prvku n	Vztahy pro výpočet										Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,1}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,2}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,3}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,4}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk}$ (kN)	Návrhová únosnost pro dvojitý spoj $F_{v,RD}$ (kN):	Využití únosnosti $F_{v,d} / F_{v,RD}$:	Smykové napětí τ_v (MPa):	Využití únosnosti $\tau_v / f_{v,d}$:
0	Úhel odklonu výslednice od směru vlákna - PRVEK 1 α_1 (rad)	Úhel odklonu výslednice od směru vlákna - PRVEK 2 α_2 (rad)	Charakteristická únosnost pod úhlem k vláknu - PRVEK 1 $f_{h,1,k}$ (MPa)	Charakteristická únosnost pod úhlem k vláknu - PRVEK 2 $f_{h,2,k}$ (MPa)	Poměr mezi pevnostmi v otáčení prvků β (-)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,1}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,2}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,3}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk,4}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevo-dřevo, $F_{v,Rk}$ (kN)	Návrhová únosnost pro dvojitý spoj $F_{v,RD}$ (kN):	Využití únosnosti $F_{v,d} / F_{v,RD}$:	Smykové napětí τ_v (MPa):	Využití únosnosti $\tau_v / f_{v,d}$:					
1	1,42	0,15	15,09	25,13	1,67	50,71	60,31	22,83	23,60	22,83	29,22	1,23	0,96	0,47					
2	1,55	0,02	14,94	25,54	1,71	50,21	61,31	22,72	23,60	22,72	29,08	1,20	0,96	0,47					
3	1,37	0,20	15,19	24,86	1,64	51,04	59,66	22,90	23,60	22,90	29,31	1,16	0,96	0,47					
4	1,19	0,38	15,87	23,23	1,46	53,33	55,75	23,40	23,60	23,40	29,95	1,10	0,96	0,47					
5	0,99	0,58	17,04	21,10	1,24	57,26	50,65	24,25	23,60	23,60	30,21	1,05	0,96	0,47					
6	0,80	0,77	18,75	18,97	1,01	62,99	45,53	25,46	23,60	23,60	30,21	1,02	0,96	0,47					
7	0,59	0,98	20,92	17,16	0,82	70,30	41,19	26,96	23,60	23,60	30,21	0,99	0,96	0,47					
8	0,38	1,19	23,26	15,85	0,68	78,16	38,05	28,52	23,60	23,60	30,21	0,97	0,96	0,47					
9	0,17	1,41	25,07	15,11	0,60	84,23	36,27	29,69	23,60	23,60	30,21	0,95	0,96	0,47					
10	0,05	1,52	25,50	14,96	0,59	85,67	35,91	29,96	23,60	23,60	30,21	0,94	0,96	0,47					
11	0,28	1,29	24,26	15,42	0,64	81,53	37,01	29,17	23,60	23,60	30,21	0,93	0,96	0,47					
12	0,50	1,07	21,98	16,51	0,75	73,84	39,63	27,67	23,60	23,60	30,21	0,94	0,96	0,47					
13	0,72	0,85	19,53	18,23	0,93	65,63	43,75	26,01	23,60	23,60	30,21	0,95	0,96	0,47					
14	0,94	0,64	17,50	20,44	1,17	58,81	49,06	24,58	23,60	23,60	30,21	0,97	0,96	0,47					
15	1,15	0,42	16,07	22,80	1,42	54,01	54,73	23,55	23,60	23,55	30,15	0,99	0,96	0,47					
16	1,35	0,22	15,24	24,72	1,62	51,22	59,32	22,94	23,60	22,94	29,36	1,05	0,96	0,47					
17	1,55	0,02	14,95	25,54	1,71	50,22	61,30	22,72	23,60	22,72	29,08	1,09	0,96	0,47					
18	1,40	0,17	15,12	25,05	1,66	50,81	60,11	22,85	23,60	22,85	29,25	1,12	0,96	0,47					
19	1,22	0,35	15,73	23,53	1,50	52,86	56,48	23,30	23,60	23,30	29,82	1,14	0,96	0,47					
20	1,04	0,53	16,75	21,58	1,29	56,27	51,78	24,04	23,60	23,60	30,21	1,16	0,96	0,47					
21	0,86	0,71	18,14	19,64	1,08	60,94	47,13	25,03	23,60	23,60	30,21	1,19	0,96	0,47					
22	0,69	0,88	19,83	17,97	0,91	66,63	43,14	26,21	23,60	23,60	30,21	1,22	0,96	0,47					
23	0,52	1,05	21,69	16,68	0,77	72,88	40,03	27,48	23,60	23,60	30,21	1,25	0,96	0,47					
24	0,36	1,21	23,48	15,76	0,67	78,88	37,82	28,66	23,60	23,60	30,21	1,27	0,96	0,47					
25	0,20	1,37	24,86	15,19	0,61	83,53	36,45	29,55	23,60	23,60	30,21	1,29	0,96	0,47					
26	0,04	1,53	25,52	14,95	0,59	85,76	35,88	29,98	23,60	23,60	30,21	1,30	0,96	0,47					
27	0,12	1,45	25,30	15,09	0,59	85,00	36,07	29,83	23,60	23,60	30,21	1,31	0,96	0,47					
28	0,28	1,29	24,26	15,42	0,64	81,51	37,01	29,17	23,60	23,60	30,21	1,31	0,96	0,47					
29	0,44	1,14	22,69	16,13	0,71	76,22	38,72	28,14	23,60	23,60	30,21	1,31	0,96	0,47					
30	0,59	0,98	20,90	17,18	0,82	70,23	41,22	26,95	23,60	23,60	30,21	1,30	0,96	0,47					
31	0,75	0,82	19,17	18,55	0,97	64,43	44,52	25,76	23,60	23,60	30,21	1,29	0,96	0,47					
32	0,92	0,66	17,67	20,22	1,14	59,37	48,52	24,70	23,60	23,60	30,21	1,27	0,96	0,47					
33	1,08	0,49	16,47	22,06	1,34	55,33	52,94	23,84	23,60	23,60	30,21	1,25	0,96	0,47					
34	1,25	0,33	15,60	23,83	1,53	52,43	57,18	23,21	23,60	23,21	29,70	1,24	0,96	0,47					
34	1,42	0,15	15,09	25,13	1,67	50,71	60,31	22,83	23,60	22,83	29,22	1,23	0,96	0,47					

$$\alpha_2 = \gamma - (90 - \alpha_1);$$

$$f_{h,1,k} = (f_{h,0,k} / (k_{90} \times \sin(\alpha_1)^2) + \cos(\alpha_1)^2); f_{h,2,k} = (f_{h,0,k} / (k_{90} \times \sin(\alpha_2)^2) + \cos(\alpha_2)^2);$$

$$\beta = (f_{h,2,k} / f_{h,1,k});$$

$$F_{v,Rk,1} = f_{h,1,k} \times t \times d;$$

$$F_{v,Rk,2} = 0,5 \times f_{h,2,k} \times t \times d;$$

$$F_{v,Rk,3} = 1,05 \times (f_{h,1,k} \times t \times d) / (2 + \beta);$$

$$F_{v,Rk,4} = (2 \times \beta \times (1 + \beta) + (4 \times \beta \times (2 + \beta) \times M_{y,Rk}) / (f_{h,1,k} \times d \times t^2)) \times t;$$

$$F_{v,Rk} = \min(M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d);$$

$$F_k = \min(F_{v,Rk,1}; F_{v,Rk,2}; F_{v,Rk,3}; F_{v,Rk,4});$$

$$F_{v,d} = (2 \times k, \text{mod}(F_k) / \gamma_{M1});$$

$$\tau_{v,d} = 1,5 \times (V_d / b \times h)$$

Obr. 44- Kruhový šroubovaný styčník - Výpočet únosnosti spoje v rámové stojce

RÁMOVÁ PŘÍČEL

Pořadí prvku n	Vztahy pro výpočet	Úhel odklonu výslednice od směru vláken - PRVEK 1 α_1 (rad)	Úhel odklonu výslednice od směru vláken - PRVEK 2 α_2 (rad)	Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům - PRVEK 1 $f_{h,1,k}$ (MPa)	Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům - PRVEK 2 $f_{h,2,k}$ (MPa)	Poměr mezi pevnostmi v otláčení prvků θ (-)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevostříh, dřevodřevostříh, $F_{v,Rk,1}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevodřevostříh, $F_{v,Rk,2}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevodřevostříh, $F_{v,Rk,3}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevodřevostříh, $F_{v,Rk,4}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřevodřevostříh, $F_{v,Rk,4}$ (kN)	Návrhová únosnost pro dvojitý spoj $F_{v,RD}$ (kN)	Využití únosnosti $F_{v,d} / F_{v,RD}$	Smykové napětí τ_v (MPa)	Využití únosnosti $\tau_v / f_{v,d}$	
0		1.43	0.14	15.07	25.18	1.67	50.64	60.44	22.81	23.60	23.60	22.81	29.20	1.23	0.50	0.24
1		1.54	0.03	14.95	25.53	1.71	50.23	61.28	22.72	23.60	23.60	22.72	29.08	1.20	0.50	0.24
2		1.36	0.21	15.22	24.78	1.63	51.13	59.48	22.92	23.60	23.60	22.92	29.34	1.16	0.50	0.24
3		1.18	0.40	15.92	23.12	1.45	53.50	55.48	23.44	23.60	23.60	23.44	30.00	1.10	0.50	0.24
4		0.98	0.59	17.12	20.99	1.23	57.51	50.38	24.31	23.60	23.60	24.31	30.21	1.06	0.50	0.24
5		0.79	0.78	18.83	18.88	1.00	63.27	45.32	25.52	23.60	23.60	25.52	30.21	1.03	0.50	0.24
6		0.59	0.99	21.00	17.11	0.81	70.56	41.06	27.01	23.60	23.60	27.01	30.21	1.00	0.50	0.24
7		0.38	1.19	23.31	15.83	0.68	78.33	38.00	28.55	23.60	23.60	28.55	30.21	0.98	0.50	0.24
8		0.16	1.41	25.08	15.11	0.60	84.27	36.26	29.70	23.60	23.60	29.70	30.21	0.96	0.50	0.24
9		0.05	1.52	25.50	14.96	0.59	85.67	35.90	29.96	23.60	23.60	29.96	30.21	0.95	0.50	0.24
10		0.27	1.30	24.29	15.41	0.63	81.63	36.98	29.19	23.60	23.60	29.19	30.21	0.95	0.50	0.24
11		0.49	1.08	22.05	16.47	0.75	74.08	39.54	27.72	23.60	23.60	27.72	30.21	0.95	0.50	0.24
12		0.71	0.86	19.62	18.15	0.92	65.93	43.56	26.07	23.60	23.60	26.07	30.21	0.96	0.50	0.24
13		0.93	0.65	17.59	20.33	1.16	59.09	48.78	24.64	23.60	23.60	24.64	30.21	0.97	0.50	0.24
14		1.13	0.44	16.14	22.68	1.41	54.22	54.43	23.60	23.60	23.60	23.60	30.20	1.00	0.50	0.24
15		1.34	0.23	15.28	24.63	1.61	51.33	59.11	22.97	23.60	23.60	22.97	29.40	1.05	0.50	0.24
16		1.54	0.03	14.95	25.53	1.71	50.23	61.27	22.72	23.60	23.60	22.72	29.09	1.09	0.50	0.24
17		1.41	0.16	15.10	25.11	1.66	50.73	60.26	22.83	23.62	23.62	22.83	29.23	1.12	0.50	0.24
18		1.23	0.34	15.68	23.64	1.51	52.70	56.73	23.27	23.60	23.60	23.27	29.78	1.13	0.50	0.24
19		1.05	0.53	16.68	21.68	1.30	56.06	52.04	23.99	23.60	23.60	23.99	30.21	1.15	0.50	0.24
20		0.87	0.70	18.06	19.72	1.09	60.69	47.34	24.98	23.60	23.60	24.98	30.21	1.18	0.50	0.24
21		0.70	0.87	19.76	18.03	0.91	66.39	43.28	26.16	23.60	23.60	26.16	30.21	1.21	0.50	0.24
22		0.53	1.04	21.63	16.71	0.77	72.69	40.11	27.44	23.60	23.60	27.44	30.21	1.24	0.50	0.24
23		0.36	1.21	23.44	15.77	0.67	78.76	37.85	28.64	23.60	23.60	28.64	30.21	1.26	0.50	0.24
24		0.20	1.37	24.85	15.19	0.61	83.49	36.47	29.55	23.60	23.60	29.55	30.21	1.28	0.50	0.24
25		0.04	1.53	25.52	14.95	0.59	85.76	35.88	29.98	23.60	23.60	29.98	30.21	1.29	0.50	0.24
26		0.12	1.45	25.29	15.03	0.59	84.98	36.08	29.83	23.60	23.60	29.83	30.21	1.30	0.50	0.24
27		0.28	1.29	24.24	15.43	0.64	81.43	37.04	29.15	23.60	23.60	29.15	30.21	1.30	0.50	0.24
28		0.44	1.13	22.64	16.16	0.71	76.07	38.78	28.11	23.60	23.60	28.11	30.21	1.30	0.50	0.24
29		0.60	0.97	20.84	17.22	0.83	70.02	41.32	26.90	23.60	23.60	26.90	30.21	1.29	0.50	0.24
30		0.76	0.81	19.11	18.61	0.97	64.19	44.68	25.71	23.60	23.60	25.71	30.21	1.28	0.50	0.24
31		0.92	0.65	17.60	20.30	1.15	59.14	48.73	24.65	23.60	23.60	24.65	30.21	1.26	0.50	0.24
32		1.09	0.48	16.41	22.16	1.35	55.14	53.18	23.80	23.60	23.60	23.80	30.21	1.24	0.50	0.24
33		1.26	0.32	15.56	23.92	1.54	52.29	57.40	23.18	23.60	23.60	23.18	29.67	1.24	0.50	0.24
34		1.43	0.14	15.07	25.18	1.67	50.64	60.44	22.81	23.62	23.62	22.81	29.20	1.23	0.50	0.24

Obr. 45- Kruhový šroubovaný styčník - Výpočet únosnosti spoje v rámové příčeli

Z porovnání výsledných hodnot působících vnitřních sil a únosností u rámové stojky a příčle je patrné, že se hodnoty liší jen minimálně a vliv odlišných složek N a V nemá na posudek zásadní dopad. Dále je možné si povšimnout, že nejvíce namáhané prvky leží v ose rámové stojky a také v ose rámové příčle. V tomto případě by spoj nevyhověl, ale z hlediska analýzy bude uvedený návrh pouze zařazen do celkového vyhodnocení. Díky vyčíslení jednotlivých charakteristických hodnot únosnosti pro jeden stříh je také možné určit rozhodující způsob porušení.

b) Analýza vybraných parametrů

U zvolených proměnných parametrů bude ověřena výslednice sil, návrhová únosnost, celkové využití únosnosti a bude také posouzeno smykové napětí. Ve specifických případech bude zaznamenán počet spojovacích prvků, což je z hlediska optimalizace zcela zásadní. Na základě vyhodnocení bude v závěru uvedeno také optimální řešení pro tento typ spoje. Veškeré vyhodnocení bude provedeno ve standardu předchozího modelu a bude měněn pouze uvedený parametr.

- Tloušťka vnějšího prvku: t_1

t_1	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
100 mm	34	37,71	24,72	1,53	0,66
160 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,41
200 mm	34	39,63	30,68	1,31	0,33

Tab. 6 - Analýza kruhového šroubovaného styčnicku - tloušťka vnějšího prvku

Při vyhodnocení byly ověřeny vždy prvky, u kterých bylo zaznamenáno největší překročení únosnosti. V případě velmi malé tloušťky dochází k výrazné redukci únosnosti a překročení nastává na kolíku mezi osami rámové stojky a příčle. Postupným zvětšováním tohoto rozměru se přenáší největší namáhání do osy příčle a vliv na únosnost je dále spíše konstantní. Výrazná změna se projevuje především u smykového napětí, které se zvětšováním průřezu klesá.

Hodnota t_1 nemá příliš zásadní vliv na celkovou únosnost spoje, nesmí se však navrhovat příliš tenké prvky, což je pravděpodobně vyloučeno posouzením ohybu

samotné rámové stojky. Z hlediska optimalizace není tento vliv rozhodující na získání úspornějšího řešení.

- Tloušťka vnitřního prvku: t_2

t_2	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
160 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,31
220 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,22
260 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,19

Tab. 7 - Analýza kruhového šroubovaného styčnicku - tloušťka vnitřního prvku

Vliv tloušťky prvku na celkovou únosnost spoje je nulový a může být použit k optimalizaci pouze v případě překročení smykového napětí.

- Vzdálenost od středu otáčení: r_i

r_i	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
782 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,47
650 mm	28	56,07	30,21	1,86	0,57
500 mm	34	92,06	30,21	3,05	0,76

Tab. 8 - Analýza kruhového šroubovaného styčnicku - vzdálenost od středu otáčení

Vlivem změny poloměru spojovacích prvků od středu otáčení se projevuje velmi zásadní rozdíl v případě únosnosti i smykového napětí. Změnou geometrie je možné redukovat pouze hodnotu výsledné působící síly, která klesá s narůstajícím ramenem r a v případě opačného postupu je možné překročit hodnotu únosnosti až několikanásobně. U smykového napětí není nárůst tak rychlý jako u charakteristické únosnosti kolíku, ale je nutné počítat i s tímto faktorem.

Při návrhu je tedy téměř pravidlo maximální využití kruhové geometrie, je však nutné brát v potaz také vysoké hodnoty napětí v oblasti čela, kde může docházet k rozštěpení. Pro zohlednění tohoto možného porušení je vhodné ponechat určitou dostatečnou rezervu ve využití únosnosti.

K největšímu namáhání dochází u tohoto parametru jednoznačně v ose rámové

příčle, což se projevilo i v předchozích případech. Z hlediska analýzy je tedy vzdálenost od středu otáčení zcela zásadním vlivem.

- Průměr spojovacího prvku: d

d	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
20 mm	42	31,00	22,57	1,37	0,45
24 mm	34	39,63	30,21	1,31	0,47
30 mm	26	51,60	36,04	1,43	0,50

Tab. 9 - Analýza kruhového šroubovaného styčnicku - průměr spojovacího prvku

Tímto rozbořem byl upřesněn předpoklad, že s nárůstem průměru spojovacích prvků je možné dojít ke snížení využití únosnosti, což však z uvedených výsledků neplatí. Při použití menšího průměru 20 mm byl navýšen počet ocelových kolíků, čímž se snížila výslednice sil F_d , ale na úkor této změny byla také výrazně snížena hodnota únosnosti. Toto řešení se tedy neprojevilo jako efektivní.

V případě standardního průměru 24 mm bylo využití únosnosti sníženo, avšak navržený spoj stále není vyhovující. U obou těchto případů bylo zjištěno maximální působení v osa rámové příčle.

U posledního analyzovaného průměru 30 mm došlo k navýšení únosnosti, ale také k nárůstu výslednice, což se projevilo ve výsledku velmi neefektivně a tímto řešením tedy není možné zajistit vyhovující spoj. U této varianty bylo zjištěno maximální působení v ose rámové stojky. Na smykové napětí nemá změna průměru kolíku výrazný dopad a byl zaznamenán jen minimální nárůst využití.

Jednořadý kruhový šroubovaný styčnick není aplikovatelný z důvodu velkých hodnot vnitřních sil působících na vybrané konstrukci a není možné získat vyhovující řešení ani jeho optimalizací. Pro další návrh bude tedy nutné doplnit geometrii o vnitřní kruh kolíků.

3.2.2 Víceřadý kruhový šroubovaný styčnick

Pro tuto analýzu bude využit předchozí model, který umožňuje zahrnutí vícenásobné kruhové geometrie a zároveň i redukci počtu účinných spojovacích prvků dle DIN 1052. [16] [17] Vzhledem k výsledkům předchozí analýzy budou dále

vyhodnoceny pouze parametry d a r_i . Změna tloušťky průřezu stojky nebo příčle se jeví jako zcela neefektivní a v tomto rozšíření kruhové geometrie by neměl další podrobný rozbor žádný význam.

- Vzdálenost od středu otáčení: r_i

r_1	r_2	n_1	n_2	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
782 mm	662 mm	34	29	28,53	30,21	0,94	0,51
650 mm	530 mm	28	23	41,98	30,21	1,39	0,62
500 mm	380 mm	22	17	73,92	30,21	2,45	0,83

Tab. 10 - Analýza víceřadého kruhového šroubovaného styčnicku - vzdálenost od středu otáčení

Díky přidání vnitřního kruhu kolíků bylo dosaženo vyhovujícího řešení, ve kterém je zahrnuta i dostatečná rezerva vlivem snížení počtu účinných spojovacích prvků na 85 %. V rámci analýzy byl vyhodnocen opět pouze vnější kruh kolíků, který je zatížen výrazně větším tečnou silou v porovnání s kruhem vnitřním. K maximálnímu namáhání dochází stejně jako v předchozích případech v ose rámové příčle.

U smykového napětí byly zaznamenány mnohem vyšší hodnoty využití než u jednořadého provedení, což je způsobeno větším počtem spojovacích prvků.

- Průměr spojovacího prvku: d

d	n_1	n_2	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
20 mm	42	37	21,44	22,57	0,95	0,48
24 mm	34	29	28,53	30,21	0,94	0,51
30 mm	26	21	39,71	35,96	1,1	0,55

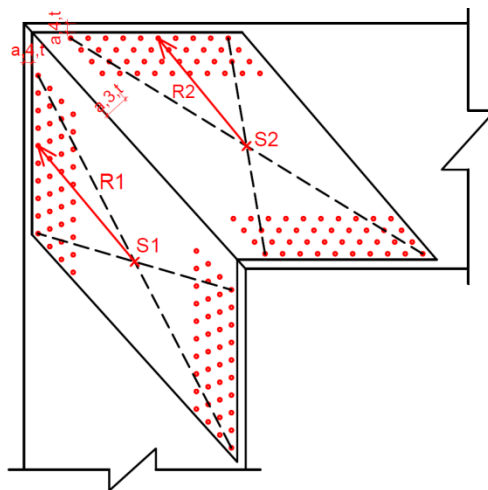
Tab. 11 - Analýza víceřadého kruhového šroubovaného styčnicku - průměr spojovacího prvku

Změnou průměru ocelového kolíku byly zjištěny stejné projevy jako u jednořadé varianty. Snížením na 20 mm bylo získáno vyhovující řešení, ale nejlépe vychází stále původní varianta. Navýšením průměru byly překročeny limitní hodnoty a tato změna se jeví pro návrh jako zcela nepoužitelná.

Po podrobnějším zkoumání všech zvolených parametrů bylo zjištěno, že pro optimalizaci kruhových šroubovaných styčnicků je nejdůležitější úprava geometrie, což znamená vytvoření maximálního ramene tečných sil. Modifikací tohoto parametru lze vytvořit funkční spoj i s případnou rezervou, která pokryje vedlejší vlivy jako je například rozšíření v čele rámového rohu. Je tedy výhodné případně navýšit rozměry konstrukčních prvků a to alespoň v místě spoje.

3.2.3 Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

V návaznosti na předchozí rozbor bude u tohoto typu styčníku zvolena obdobná geometrie tak, aby bylo dosaženo maximální vzdálenosti všech spojovacích prvků od středu otáčení. Jedná se však rámcově o odlišný způsob návrhu, kde bude jako hlavní parametr vyhodnocen průměr spojovacích prvků d a dále počet jejich řad n_f . Hlavním důvodem je zavést limitující faktor jako v předchozí variantě, což byla šířka konstrukčního prvku. Jedna řada bude tvořena 10 ocelovými kolíky a principiálně tedy bude zachován jejich počet i v případě změny průměru. Jako srovnání s předchozí variantou bude především celkový počet spojovacích prvků v závislosti na celkové na únosnosti spoje. Řešení styčníku je dále upřesněno následujícím schématem.



Obr. 46- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - geometrie spoje

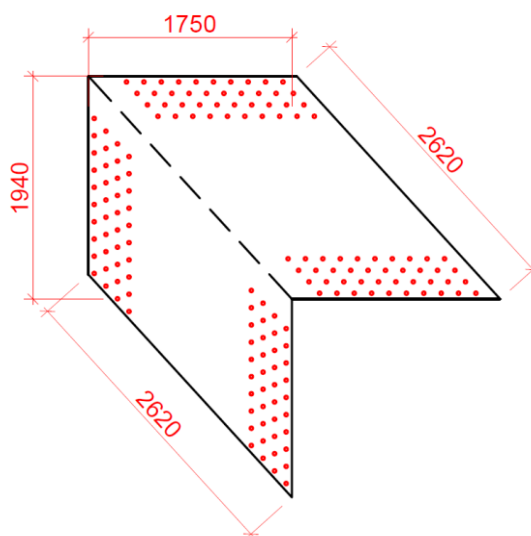
Na uvedeném schématu je vyobrazeno rozmístění jednotlivých ocelových kolíků vzhledem ke středům otáčení S_1 a S_2 , které jsou odlišné vzhledem k rozdílným výškám průřezů u stojky a příčle. Kvůli tomuto rozdílu zároveň platí, že spojovací prvky mají v lichoběžnících odlišné poloměry R_1 a R_2 . V tomto provedení budou analyticky vyhodnoceny jednotlivé změny zvolených parametrů.

Před samotným analytickým vyhodnocením ocelových kolíků je však také nutné navrhnout dostatečně únosnou ocelovou desku, která bude pro zjednodušení posouzena pouze jednorázově a to pro nejméně příznivou variantu, kterou je použití spojovacích prvků M30.

a) Návrh ocelové desky

Posouzení ocelové desky budou provedeno na základě předchozího rozboru (viz. 2.3.3 b). Deska z oceli **S235** bude opatřena otvory pro šrouby M 30 a její rozměry jsou upřesněny na následujícím schématu, které vyplývá z uvedených minimálních roztečí šroubů dle ČSN 1993-1-1. [28]

- Min. rozteč mezi kolíky ve směru síly: $p_1 = 115 \text{ mm}$
- Min. rozteč mezi kolíky kolmo na sílu: $p_2 = 100 \text{ mm}$
- Min. vzdálenost od okraje ve směru síly: $e_1 = 65 \text{ mm}$
- Min. vzdálenost od okraje kolmo na sílu: $e_2 = 50 \text{ mm}$



Obr. 47- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - ocelová deska

Rozhodující pro posudek bude část u rámové stojky, kde je menší šířka průřezu. Je nutné uvažovat také s kritickým průřezem, kde by mohlo navzdory prostřídání otvorů dojít k propojení lomové linie a bude tedy počítáno s plně oslabeným průřezem. Deska bude navržena na maximální počet čtyř řad spojovacích prvků na každé straně průřezu, což by mělo být dostačující ke splnění únosnosti.

Pro návrh bude zvolena tloušťka desky $d = 20 \text{ mm}$.

1. Tah

Rozhodující tlaková síla působí v rámové stojce o hodnotě $N_{ED} = 54,05 \text{ kN}$.

- Návrhová únosnost neoslab. průřezu: $N_{t,RD} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,035 \times 235 \times 10^3}{1,0} = 8225 \text{ kN}$

- Plocha průřezu: $A = d \times h = 0,02 \times 1,75 = 0,035 \text{ m}^2$
- Mez kluzu oceli: $f_y = 235 \text{ MPa}$
- Dílčí součinitel spolehlivosti: $\gamma_{M0} = 1,0$

- Návrhová únosnost oslabeného průřezu:

$$N_{u,RD} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 0,02972 \times 360 \times 10^3}{1,25} = 7703 \text{ kN}$$

- Plocha průřezu:
 $A_{net} = (h - 8 \times h_0) \times d = (1,75 - 8 \times 0,033) \times 0,02 = 0,02972 \text{ m}^2$
- Mez pevnosti oceli: $f_y = 360 \text{ MPa}$
- Dílčí součinitel spolehlivosti: $\gamma_{M0} = 1,25$
- Průměr předvrtaného otvoru: $h_0 = 0,33$

- Posouzení MSÚ: $\frac{N_{ED}}{\min(N_{t,RD}; N_{u,RD})} \leq 1,0$

$$\frac{54,05}{\min(8225; 7703)} \leq 1,0$$

$$0,007 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

Vzhledem k zcela patrným vysokým hodnotám únosnosti v tahu bude působení v tlaku také zanedbatelné a nebude tedy posuzováno.

2. Ohyb

Rozhodující ohybový moment má hodnotu $M_{ED} = 905,84 \text{ kN}$.

- Návrhová únosnost v ohybu uprostřed desky:

$$M_{el,RD} = \frac{W_{el} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0229 \times 235 \times 10^3}{1,0} = 5381 \text{ kNm}$$

- Elastický průřezový modul:

$$W_{el} = \frac{1}{6} \times d \times h_x^2 = \frac{1}{6} \times 0,02 \times 2,62^2 = 0,0229 \text{ m}^3$$

- Ohybový moment v diagonále:

$$M_{2,ED} = M_{1,ED} + V \times e = 905,84 + 176,19 \times 0,96 = 1075 \text{ kNm}$$

- Maximální posouvající síla: $V = V_{ED} = 176,13 \text{ kN}$
- Rameno síly: $e = 0,96 \text{ m}$

Hodnota h_x značí šířku průřezu v místě diagonály, kde se napojují konstrukční prvky. V tomto místě dochází k nárůstu ohybového momentu vlivem posouvající síly V na rameně e , jehož hodnota byla určena z geometrie.

- Návrhová únosnost v ohybu v oslabeném průřezu:

$$M_{c,RD} = \frac{W_{el,min} \times f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{0,01845 \times 235 \times 10^3}{1,0} = 4336 \text{ kNm}$$

- Elastický průřezový modul oslabeného průřezu:

$$W_{el,min} = I_{net} / \frac{hx}{2} = 0,02417 / \frac{2,62}{2} = 0,01845 \text{ m}^3$$

- Moment setrvačnost oslabeného průřezu:

$$I_{net} = \frac{1}{12} \times d \times h_x^3 - n \times \frac{1}{12} \times d \times h_o^3 - 2 \times d \times h_o \times (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2) \\ \frac{1}{12} \times 0,02 \times 2,62^3 - 8 \times \frac{1}{12} \times 0,02 \times 0,033^3 - 2 \times 0,02 \times 0,033 \times (0,84^2 + 0,97^2 + 1,10^2 + 1,24^2) = 0,02417 \text{ m}^4$$

Hodnoty r_i vyjadřují vzdálenost jednotlivých otvorů od těžiště.

- Posouzení MSÚ: $\frac{M_{1,ED}}{M_{c,RD}} \leq 1,0$; $\frac{M_{2,ED}}{M_{el,RD}} \leq 1,0$
 $\frac{905,84}{4336} \leq 1,0$; $\frac{1075}{5381} \leq 1,0$
 $0,209 \leq 1,0$ $0,2 \leq 1,0$ **VYHOVUJE**

3. Smyk

Rozhodující posouvající síla má hodnotu $V_{ED} = 176,13 \text{ kN}$.

- Návrhová únosnost ve smyku: $V_{c,RD} = \frac{A_v \times f_y}{\sqrt{3} \times \gamma_{M0}} = \frac{(0,03352 \times 235 \times 10^3) / \sqrt{3}}{1,0} = 4548 \text{ kN}$

- Účinná plocha průřezu:

$$A_v = (h_p - 8 \times h_o) \times d = (1,94 - 8 \times 0,033) \times 0,02 = 0,03352 \text{ m}^2$$

Hodnota h_p vyjadřuje výšku průřezu v místě rámové příčle.

- Posouzení MSÚ:

$$\frac{V_{ED}}{V_{c, RD}} \leq 1,0$$

$$\frac{176,13}{4548} \leq 1,0$$

$$0,038 \leq 1,0 \quad \underline{\underline{VYHOVUJE}}$$

Navržená ocelová deska o tloušťce $d = 20 \text{ mm}$ vyhoví s maximálním využitím 20%, což je dostatečná rezerva. Návrh by bylo případně ještě možné optimalizovat, avšak tato práce se zabývá především analýzou spojovacích prvků a dřevěných konstrukčních částí. Pro tyto účely je tedy návrh dostačující a nebude dále modifikován.

Pro ověření správnosti tohoto posudku byla provedena klasifikace průřezu dle ČSN EN 1993-1-1 a dále byly ověřeny mezní hodnoty únosnosti samotného ocelového kolíku ve stříhu a v otláčení. Průřez odpovídá **2. klasifikační třídě** a na základě předchozí analýzy bylo vyhodnoceno, že k mezního stavu únosnosti bude dosaženo nejprve v dřevěném konstrukčním prvku. Únosnost kolíků v místě ocelové desky tedy nebude mít vliv na celkovou únosnost spoje.

b) Výpočetní model

Stejně jako v předchozím případě byl vytvořen analytický model, který zobrazuje využití únosnosti jednotlivých spojovacích prvků a také smykové zatížení rámového rohu. Jako základní provedení byla vybrána varianta s ocelovými kolíky M30, na které bude analyzován vliv přidání počtu řad spojovacích prvků $n_{\text{ř}}$.

Při změně průměru ocelových kolíků d bude nutné provést také novou geometrii spoje a vyčíslení souřadnic x_i a z_i . K tomuto účelu bude využit software Autocad 2017, který umožňuje rychlé provedení potřebných úprav. Mimo jiné tyto změny také znamenají nové vyhodnocení minimálních vzdáleností spojovacích prvků, které musí být porovnány z hlediska ČSN EN 1995-1-1 a ČSN EN 1993-1-1.

V rámci tohoto řešení zůstávají zachovány všechny materiálové charakteristiky, konstrukční rozměry a je uvažováno s vloženou ocelovou deskou tloušťky 20 mm dle předchozího návrhu. Vzhledem k rozdílné geometrii spoje v rámové příčli bude proveden posudek v obou konstrukčních prvcích pro vyhodnocení nejméně příznivého namáhání.

ANALYTICKÝ MODEL ŠROUBOVANÉHO STYČNÍKU S VNITŘNÍ OCELOVOU DESKOU:

Hodnoty vnitřních sil:

Ohybový moment:	$M =$	905,84	kNm
Normálová síla v příčli:	$N_p =$	54,05	kN
Normálová síla ve sloupu:	$N_s =$	189,06	kN
Posouvající síla v příčli:	$V_p =$	176,13	kN
Posouvající síla ve sloupu:	$V_s =$	54,05	kN
Výška příčle:	$H_p =$	2,1	m
Výška stojky:	$H_s =$	1,9	m

Rozhodující proměnné parametry:

Tloušťka stojky:	$t_1 =$	0,14	m
Tloušťka příčle:	$t_2 =$	0,02	m
Průměr kolíku:	$d =$	0,03	m
Charakteristická pevnost kolíku v tahu:	$f_{u,k} =$	400	MPa
Charakteristická hustota dřeva:	$\rho_k =$	410	kg/m ³ (GL32c)

Geometrie spoje:

$a_1 =$	$(3 + 2 \times (\cos \alpha)) \times d =$	0,15	m	(minimální rozteč mezi kolíky rovnoběžně a vláknům)
$a_2 =$	$3 \times d =$	0,09	m	(minimální rozteč mezi kolíky kolmo k vláknům)
$a_{3,t} =$	$\max(7 \times d; 80 \text{ mm}) =$	0,21	m	(minimální vzdálenost od zatíženého konce)
$a_{4,t} =$	$4 \times d =$	0,12	m	(minimální vzdálenost od zatíženého okraje)
$p_1 =$		0,115	m	(minimální rozteč mezi kolíky rovnoběžně a vláknům)
$p_2 =$		0,1	m	(minimální rozteč mezi kolíky kolmo k vláknům)

Počet kolíků:

$n_{ef} =$	$\min(n; n^{0,9} \times (a_1 / 13 \times d)^{1/2}) \times n_f =$	50,04	-	(redukce efektivního počtu kolíků)
------------	--	-------	---	------------------------------------

Počet řad:

$n_f =$		8	-
---------	--	---	---

Vnitřní síly působící na kolík ve stožce:

$F_n =$	$N / (n_{ef}) =$	3,78	kN	(normálová síla působící na jeden kolík)
$F_v =$	$V / (n_{ef}) =$	1,08	kN	(posouvající síla působící na jeden kolík)
$V_m =$	$M \times (\sum 2 \times x) / (\sum r_i^2) =$	552,00	kN	(maximální posouvající síla od ohybového momentu)
$V_d =$	$V_m - V_p/2 =$	524,97	kN	(smyková síla působící v místě kolíkového spoje)

Vnitřní síly působící na kolík v příčli:

$F_n =$	$N / (n_{ef}) =$	1,08	kN	(normálová síla působící na jeden kolík)
$F_v =$	$V / (n_{ef}) =$	3,52	kN	(posouvající síla působící na jeden kolík)
$V_m =$	$M \times (\sum 2 \times x) / (\sum r_i^2) =$	552,00	kN	(maximální posouvající síla od ohybového momentu)
$V_d =$	$V_m - V_p/2 =$	463,93	kN	(smyková síla působící v místě kolíkového spoje)

Vyjádření minimální únosnosti spojovacího prvku:

$M_{y,Rk} =$	$0,3 \times f_{u,k} \times d^2 \times 6 =$	831182,72	Nmm	(charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti)
$f_{h,0,k} =$	$0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k =$	23,53	MPa	(charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vláknem)
$k_{90} =$	$1,35 + 0,015 \times d =$	1,80	-	(součinitel pro zohlednění typu dřeva - LLD)
$k_{mod} =$		0,80	-	(modifikační součinitel - Třída provozu 1, Střednědobé zatížení, LLD)
$\psi_M =$		1,25	-	(součinitel pro vlastnosti materiálu a únosnosti - LLD)
$f_{v,k} =$		3,20	MPa	(charakteristická pevnost ve smyku)
$f_{v,d} =$	$k_{mod} \times (f_{v,k} / \psi_M) =$	2,05	MPa	(návrhová pevnost ve smyku)

Obr. 48- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - Proměnné parametry a výpočet vnitřních sil

Rozložení vnitřní síly od F_m pro jednotlivé kolký a vyjádření celkové výslednice:

RÁMOVÁ STOJKA													
Pořadí prvku n	Souřadnice X _s (m)	Souřadnice Z _s (m)	Poloměr r _s (m)	r _s 2 (m ²)	Úhel mezi silou F _m a směrem vláken β (deg)	Úhel mezi silou F _m a směrem vláken β (rad)	Vztahy pro výpočet	Tečná síla F _m (kN)	Normální složka F _{m,n} (kN)	Posouvající složka F _{m,v} (kN)	Výslednice síl F _d (kN)	Celkový úhel od směru vláken α (rad)	Celkový úhel od směru vláken α (deg)
1	0,83	1,59	1,79	3,22	62,44	1,09		26,22	12,13	23,24	29,07	0,99	56,81
2	0,83	1,44	1,66	2,76	60,04	1,05		24,30	12,13	21,05	27,26	0,95	54,29
3	0,83	1,29	1,53	2,35	57,24	1,00		22,43	12,13	18,86	25,51	0,90	51,41
4	0,83	1,14	1,41	1,99	53,94	0,94		20,62	12,13	16,67	23,84	0,84	48,12
5	0,83	0,99	1,29	1,67	50,03	0,87		18,89	12,13	14,47	22,25	0,77	44,35
6	0,83	0,84	1,18	1,39	45,34	0,79		17,26	12,13	12,28	20,78	0,70	40,02
7	0,83	0,69	1,08	1,17	39,74	0,69		15,78	12,13	10,09	19,44	0,61	35,06
8	0,83	0,54	0,99	0,98	33,05	0,58		14,48	12,13	7,89	18,27	0,51	29,42
9	0,83	0,39	0,92	0,84	25,17	0,44		13,41	12,13	5,70	17,30	0,40	23,08
10	0,83	0,24	0,86	0,75	16,13	0,28		12,63	12,13	3,51	16,56	0,28	16,09
11	0,73	1,48	1,65	2,72	63,75	1,11		24,13	10,67	21,64	26,92	1,00	57,54
12	0,73	1,33	1,52	2,30	61,24	1,07		22,18	10,67	19,44	25,10	0,96	54,85
13	0,73	1,18	1,39	1,93	58,26	1,02		20,29	10,67	17,25	23,34	0,90	51,75
14	0,73	1,03	1,26	1,59	54,67	0,95		18,46	10,67	15,06	21,66	0,84	48,16
15	0,73	0,88	1,14	1,31	50,32	0,88		16,72	10,67	12,87	20,08	0,77	43,98
16	0,73	0,73	1,03	1,07	45,00	0,79		15,09	10,67	10,67	18,63	0,68	39,12
17	0,73	0,58	0,93	0,87	38,47	0,67		13,63	10,67	8,48	17,33	0,58	33,49
18	0,73	0,43	0,85	0,72	30,50	0,53		12,39	10,67	6,29	16,22	0,47	27,01
19	0,73	0,28	0,78	0,61	20,99	0,37		11,43	10,67	4,09	15,35	0,34	19,70
20	0,73	0,13	0,74	0,55	10,10	0,18		10,84	10,67	1,90	14,75	0,20	11,66
21	0,63	1,37	1,51	2,27	65,31	1,14	$F_{m,v} = M \times (r_1 / (n \times r_1 \times 2)) =$ $F_{m,v} = \sin(\theta) \times F_{m,v}$ $F_{m,n} = \cos(\theta) \times F_{m,n}$ $\theta = \arctg(Z_1 / X_1)$ $F_d = ((F_{m,n} + F_{m,n})^2 + (F_{m,v} + F_{m,v})^2)^{0,5}$	22,04	9,21	20,03	24,78	1,02	58,40
22	0,63	1,22	1,37	1,89	62,69	1,09		20,07	9,21	17,84	22,95	0,97	55,53
23	0,63	1,07	1,24	1,54	59,51	1,04		18,15	9,21	15,64	21,17	0,91	52,17
24	0,63	0,92	1,12	1,24	55,60	0,97		16,30	9,21	13,45	19,49	0,84	48,21
25	0,63	0,77	0,99	0,99	50,71	0,89		14,54	9,21	11,26	17,91	0,76	43,53
26	0,63	0,62	0,88	0,78	44,54	0,78		12,92	9,21	9,06	16,48	0,66	37,99
27	0,63	0,47	0,79	0,62	36,73	0,64		11,49	9,21	6,87	15,23	0,55	31,48
28	0,63	0,32	0,71	0,50	26,93	0,47		10,33	9,21	4,68	14,21	0,42	23,91
29	0,63	0,17	0,65	0,43	15,10	0,26		9,54	9,21	2,49	13,47	0,27	15,35
30	0,63	0,02	0,63	0,40	1,82	0,03		9,21	9,21	0,29	13,06	0,11	6,03
31	0,53	1,26	1,37	1,87	67,19	1,17		19,98	7,75	18,42	22,65	1,04	59,42
32	0,53	1,11	1,23	1,51	64,48	1,13		17,98	7,75	16,23	20,79	0,98	56,34
33	0,53	0,96	1,10	1,20	61,10	1,07		16,03	7,75	14,03	19,01	0,92	52,67
34	0,53	0,81	0,97	0,94	56,80	0,99		14,15	7,75	11,84	17,32	0,84	48,27
35	0,53	0,66	0,85	0,72	51,24	0,89		12,37	7,75	9,65	15,75	0,75	42,95
36	0,53	0,51	0,74	0,54	43,90	0,77		10,75	7,75	7,46	14,34	0,64	36,52
37	0,53	0,36	0,64	0,41	34,19	0,60		9,37	7,75	5,26	13,16	0,50	28,83
38	0,53	0,21	0,57	0,33	21,62	0,38		8,33	7,75	3,07	12,25	0,35	19,80
39	0,53	0,06	0,53	0,28	6,46	0,11		7,80	7,75	0,88	11,69	0,17	9,64
40	0,53	0,09	0,54	0,29	9,64	0,17		7,86	7,75	-1,32	11,53	-0,02	-1,17

Obr. 49- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - Výpočet výslednice sil a úhlu od směru vláken

RÁMOVÁ STOJKA										
Pořadí prvku n	Vztahy pro výpočet	Úhel odklonu výslednice od směru vláken $\alpha, 1$ (rad)	Charakteristická pevnost v otažení pod úhlem k vláknům - PRVEK $1/f_{h,1,k}$ (MPa)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, $F_{v,Rk,1}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, $F_{v,Rk,2}$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, $F_{v,Rk,3}$ (kN)	Návrhová únosnost pro dvojitý spoj $F_{v,RD}$ (kN)	Využití únosnosti $F_{v,d} / F_{v,RD}$	Smykové napětí τ_v (MPa)	Využití únosnosti $\tau_v / f_{v,d}$
1		0,99	63,35	34,28	44,61	43,87	0,66	1,48	0,72	0,72
2		0,95	15,41	64,71	34,85	45,08	44,61	0,61	1,48	0,72
3		0,90	15,81	66,39	35,55	45,66	45,51	0,56	1,48	0,72
4		0,84	16,30	68,48	36,42	46,37	46,62	0,51	1,48	0,72
5		0,77	16,92	71,06	37,51	47,24	48,01	0,46	1,48	0,72
6		0,70	17,68	74,27	38,85	48,30	49,73	0,42	1,48	0,72
7		0,61	18,62	78,20	40,49	49,56	51,83	0,38	1,48	0,72
8		0,51	19,73	82,85	42,43	51,01	54,31	0,34	1,48	0,72
9		0,40	20,96	88,02	44,59	52,58	57,07	0,30	1,48	0,72
10		0,28	22,17	93,12	46,72	54,08	59,80	0,28	1,48	0,72
11		1,00	14,99	62,98	34,12	44,47	43,67	0,62	1,48	0,72
12		0,96	15,33	64,40	34,72	44,97	44,44	0,56	1,48	0,72
13		0,90	15,76	66,19	35,47	45,59	45,40	0,51	1,48	0,72
14		0,84	16,30	68,45	36,41	46,37	46,61	0,46	1,48	0,72
15		0,77	16,98	71,33	37,62	47,33	48,15	0,42	1,48	0,72
16		0,68	17,85	74,97	39,14	48,52	50,10	0,37	1,48	0,72
17		0,58	18,93	79,49	41,03	49,96	52,52	0,33	1,48	0,72
18		0,47	20,20	84,84	43,26	51,62	55,38	0,29	1,48	0,72
19		0,34	21,57	90,61	45,67	53,34	58,46	0,26	1,48	0,72
20		0,20	22,79	95,72	47,80	54,83	61,18	0,24	1,48	0,72
21		1,02	14,89	62,55	33,94	44,32	43,44	0,57	1,48	0,72
22		0,97	15,25	64,03	34,56	44,84	44,24	0,52	1,48	0,72
23		0,91	15,70	65,94	35,36	45,51	45,26	0,47	1,48	0,72
24		0,84	16,29	68,42	36,40	46,36	46,59	0,42	1,48	0,72
25		0,76	17,06	71,65	37,75	47,44	48,33	0,37	1,48	0,72
26		0,66	18,06	75,85	39,51	48,81	50,57	0,33	1,48	0,72
27		0,55	19,32	81,15	41,72	50,48	53,40	0,29	1,48	0,72
28		0,42	20,80	87,36	44,32	52,38	56,72	0,25	1,48	0,72
29		0,27	22,28	93,60	46,91	54,22	60,05	0,22	1,48	0,72
30		1,11	23,33	97,98	48,74	55,47	62,39	0,21	1,48	0,72
31		1,04	14,77	62,05	33,73	44,15	43,18	0,52	1,48	0,72
32		0,98	15,14	63,60	34,38	44,69	44,01	0,47	1,48	0,72
33		0,92	15,63	65,64	35,24	45,40	45,10	0,42	1,48	0,72
34		0,84	16,28	68,38	36,38	46,34	46,57	0,37	1,48	0,72
35		0,75	17,16	72,08	37,93	47,58	48,55	0,32	1,48	0,72
36		0,64	18,34	77,02	40,00	49,18	51,20	0,28	1,48	0,72
37		0,50	19,84	83,34	42,64	51,16	54,58	0,24	1,48	0,72
38		0,35	21,55	90,53	45,64	53,32	58,42	0,21	1,48	0,72
39		0,17	23,02	96,68	48,20	55,10	61,69	0,19	1,48	0,72
40		0,02	23,53	98,81	49,09	55,71	62,83	0,18	1,48	0,72

Obr. 50- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - Výpočet únosnosti spoje v rámové stojce

Rozložení vnitřní síly od $F_{m,1}$ pro jednotlivé kolíky a vyjádření celkové výslednice:

Pořadí prvku n	Souřadnice X_n (m)	Souřadnice Z_n (m)	Poloměr r_n (m)	r_n^2 (m ²)	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken δ (deg)	Úhel mezi silou $F_{m,n}$ a směrem vláken β (rad)	Vztahy pro výpočet	Tečná síla $F_{t,n}$ (kN)	Normálová složka $F_{n,n}$ (kN)	Posouvající složka $F_{t,n}$ (kN)	Výslednice sil $F_{t,d}$ (kN)	Celkový úhel od směru vláken α (deg)	Celkový úhel od směru vláken α (deg)
1	0,92	1,51	1,77	3,13	58,65	1,02	$F_{m,v} = M \times (r_1 \times r_1 \times r_1 \times r_1) =$ $F_{m,v} = \sin(\theta) \times F_{m,n}$ $F_{m,d} = \cos(\theta) \times F_{m,n}$ $B = \arctg(Z_i / X_i)$ $F_{t,d} = ((F_{t,n} + F_{m,n})^2 + (F_{t,n} + F_{m,n})^2)^{0,5}$ $\arctg \alpha = (F_{t,v} + F_{m,v}) / (F_{t,n} + F_{m,n})$	24,79	12,90	21,17	28,37	1,06	60,48
2	0,92	1,36	1,64	2,70	55,92	0,98		23,02	12,90	19,07	26,56	1,02	58,25
3	0,92	1,21	1,52	2,31	52,75	0,92		21,31	12,90	16,96	24,80	0,97	55,69
4	0,92	1,06	1,40	1,97	49,05	0,86		19,68	12,90	14,86	23,09	0,92	53,75
5	0,92	0,91	1,29	1,67	44,69	0,78		18,14	12,90	12,76	21,46	0,86	49,35
6	0,92	0,76	1,19	1,42	39,56	0,69		16,73	12,90	10,65	19,91	0,79	45,40
7	0,92	0,61	1,10	1,22	33,55	0,59		15,48	12,90	8,55	18,47	0,71	40,82
8	0,92	0,46	1,03	1,06	26,57	0,46		14,42	12,90	6,45	17,17	0,62	35,50
9	0,92	0,31	0,97	0,94	18,62	0,33		13,61	12,90	4,35	16,04	0,51	29,37
10	0,92	0,16	0,93	0,87	9,87	0,17		13,09	12,90	2,24	15,12	0,39	22,41
11	0,82	1,42	1,64	2,69	60,00	1,05		22,99	11,50	19,91	26,59	1,08	61,77
12	0,82	1,27	1,51	2,29	57,15	1,00		21,19	11,50	17,80	24,76	1,04	59,47
13	0,82	1,12	1,39	1,93	53,79	0,94		19,46	11,50	15,70	22,97	0,99	56,81
14	0,82	0,97	1,27	1,61	49,79	0,87		17,81	11,50	13,60	21,24	0,94	53,70
15	0,82	0,82	1,16	1,34	45,00	0,79		16,26	11,50	11,50	19,59	0,87	50,05
16	0,82	0,67	1,06	1,12	39,25	0,69		14,85	11,50	9,39	18,02	0,80	45,76
17	0,82	0,52	0,97	0,94	32,38	0,57		13,61	11,50	7,29	16,58	0,71	40,68
18	0,82	0,37	0,90	0,81	24,29	0,42		12,61	11,50	5,19	15,30	0,61	34,70
19	0,82	0,22	0,85	0,72	15,02	0,26		11,90	11,50	3,08	14,20	0,48	27,71
20	0,82	0,07	0,82	0,68	4,88	0,09		11,54	11,50	0,98	13,36	0,34	19,69
21	0,72	1,33	1,51	2,29	61,57	1,07		21,20	10,09	18,65	24,82	1,10	63,25
22	0,72	1,18	1,38	1,91	58,61	1,02		19,38	10,09	16,54	22,96	1,06	60,89
23	0,72	1,03	1,26	1,58	55,05	0,96		17,62	10,09	14,44	21,15	1,01	58,11
24	0,72	0,88	1,14	1,29	50,71	0,89		15,94	10,09	12,34	19,40	0,96	54,83
25	0,72	0,73	1,03	1,05	45,40	0,79		14,37	10,09	10,23	17,72	0,89	50,91
26	0,72	0,58	0,92	0,85	38,85	0,68		12,96	10,09	8,13	16,14	0,81	46,20
27	0,72	0,43	0,84	0,70	30,85	0,54		11,76	10,09	6,03	14,70	0,71	40,51
28	0,72	0,28	0,77	0,60	21,25	0,37		10,83	10,09	3,93	13,43	0,59	33,68
29	0,72	0,13	0,73	0,54	10,24	0,18		10,26	10,09	1,82	12,39	0,45	25,55
30	0,72	0,02	0,72	0,52	1,59	0,03		10,10	10,09	-0,28	11,63	0,28	16,17
31	0,62	1,24	1,39	1,92	63,44	1,11		19,44	8,69	17,38	23,07	1,13	64,95
32	0,62	1,09	1,25	1,57	60,37	1,05		17,58	8,69	15,28	21,19	1,09	62,54
33	0,62	0,94	1,13	1,27	56,59	0,99		15,79	8,69	13,18	19,35	1,04	59,66
34	0,62	0,79	1,00	1,01	51,88	0,91		14,08	8,69	11,08	17,56	0,98	56,20
35	0,62	0,64	0,89	0,79	45,91	0,80		12,49	8,69	8,97	15,86	0,91	51,97
36	0,62	0,49	0,79	0,62	38,32	0,67		11,08	8,69	6,87	14,26	0,82	46,75
37	0,62	0,34	0,71	0,50	28,74	0,50		9,91	8,69	4,77	12,81	0,70	40,30
38	0,62	0,19	0,65	0,42	17,04	0,30		9,09	8,69	2,66	11,56	0,56	32,32
39	0,62	0,04	0,62	0,39	3,69	0,06		8,71	8,69	0,56	10,59	0,40	22,66
40	0,62	0,11	0,63	0,40	10,06	0,18		8,83	8,69	-1,54	9,97	0,20	11,44

Obr. 51- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - Výpočet výslednice sil u rámové příčle

RÁMOVÁ PŘÍČEL											
Pořadí prvku n	Vztahy pro výpočet	Úhel odklonu výslednice od směru vláken α_1 (rad)	Charakteristická pevnost v otažení pod úhlem k vláknům - PRVEK $1.f/h,1,k$ (MPa)	Charakteristická únosnost pro 1 dřev. $F_v,Rk,1$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřev. $F_v,Rk,2$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřev. $F_v,Rk,3$ (kN)	Charakteristická únosnost pro 1 stříh, dřev. F_v,Rk (kN)	Návrhová únosnost pro dvojitý spoj F_v,RD (kN)	Využití únosnosti $F_d / F_v,RD$	Smykové napětí τ_v (Mpa)	Využití únosnosti $\tau_v / f_{v,d}$
1		1,06	14,66	61,55	33,52	43,97	33,52	42,91	0,66	1,32	0,65
2		1,02	14,91	62,62	33,97	44,35	33,97	43,48	0,61	1,32	0,65
3		0,97	15,22	63,94	34,52	44,81	34,52	44,19	0,56	1,32	0,65
4		0,92	15,62	65,60	35,22	45,39	35,22	45,08	0,51	1,32	0,65
5		0,86	16,11	67,68	36,09	46,10	36,09	46,20	0,46	1,32	0,65
6		0,79	16,74	70,32	37,20	47,00	37,20	47,61	0,42	1,32	0,65
7		0,71	17,54	73,67	38,60	48,10	38,60	49,40	0,37	1,32	0,65
8		0,62	18,54	77,85	40,34	49,45	40,34	51,64	0,33	1,32	0,65
9		0,51	19,74	82,89	42,45	51,02	42,45	54,34	0,30	1,32	0,65
10		0,39	21,08	88,55	44,81	52,74	44,81	57,36	0,26	1,32	0,65
11		1,08	14,52	60,98	33,28	43,76	33,28	42,60	0,62	1,32	0,65
12		1,04	14,77	62,03	33,72	44,14	33,72	43,16	0,57	1,32	0,65
13		0,99	15,08	63,35	34,28	44,61	34,28	43,88	0,52	1,32	0,65
14		0,94	15,49	65,05	34,99	45,20	34,99	44,78	0,47	1,32	0,65
15		0,87	16,01	67,23	35,90	45,95	35,90	45,96	0,43	1,32	0,65
16		0,80	16,68	70,07	37,09	46,91	37,09	47,48	0,38	1,32	0,65
17		0,71	17,56	73,77	38,64	48,13	38,64	49,46	0,34	1,32	0,65
18		0,61	18,69	78,50	40,61	49,65	40,61	51,99	0,29	1,32	0,65
19		0,48	20,06	84,27	43,03	51,45	43,03	55,07	0,26	1,32	0,65
20		0,34	21,57	90,61	45,67	53,35	45,67	58,46	0,23	1,32	0,65
21		1,10	14,37	60,35	33,02	43,54	33,02	42,26	0,59	1,32	0,65
22		1,06	14,61	61,37	33,45	43,90	33,45	42,81	0,54	1,32	0,65
23		1,01	14,93	62,69	34,00	44,37	34,00	43,52	0,49	1,32	0,65
24		0,96	15,34	64,41	34,72	44,98	34,72	44,44	0,44	1,32	0,65
25		0,89	15,88	66,70	35,68	45,77	35,68	45,67	0,39	1,32	0,65
26		0,81	16,61	69,77	36,97	46,81	36,97	47,32	0,34	1,32	0,65
27		0,71	17,59	73,90	38,69	48,17	38,69	49,53	0,30	1,32	0,65
28		0,59	18,89	79,33	40,96	49,92	40,96	52,43	0,26	1,32	0,65
29		0,45	20,49	86,04	43,76	51,98	43,76	56,02	0,22	1,32	0,65
30		0,28	22,16	93,07	46,70	54,07	46,70	59,77	0,19	1,32	0,65
31		1,13	14,21	59,67	32,73	43,29	32,73	41,90	0,55	1,32	0,65
32		1,09	14,44	60,65	33,14	43,64	33,14	42,42	0,50	1,32	0,65
33		1,04	14,75	61,94	33,68	44,10	33,68	43,11	0,45	1,32	0,65
34		0,98	15,16	63,67	34,41	44,72	34,41	44,05	0,40	1,32	0,65
35		0,91	15,73	66,06	35,41	45,55	35,41	45,33	0,35	1,32	0,65
36		0,82	16,52	69,39	36,81	46,68	36,81	47,11	0,30	1,32	0,65
37		0,70	17,63	74,06	38,76	48,23	38,76	49,61	0,26	1,32	0,65
38		0,56	19,15	80,44	41,43	50,26	41,43	53,03	0,22	1,32	0,65
39		0,40	21,04	88,35	44,73	52,68	44,73	57,25	0,18	1,32	0,65
40		0,20	22,82	95,83	47,84	54,86	47,84	61,24	0,16	1,32	0,65

Obr. 52- Šroubovaný styčnick s vnitřní ocelovou deskou - Výpočet únosnosti spoje v rámové příčli

Z důvodu symetrie byl v analytickém modelu proveden rozbor pouze u poloviny spojovacích prvků. Ve výpočtu složek vnitřních sil je však uvažováno komplexně s celým spojem.

Výsledek tohoto rozboru jednoznačně ukazuje, že maximální využití únosnosti se projeví u prvku s největším ramenem od středu otáčení. Posouzení by tedy postačovalo provést pouze v nejvzdálenějším bodě. Díky odlišné geometrii připojení konstrukčních prvků a rozdílným vnitřním silám vyšlo maximální namáhání u obou částí podobně. U tohoto provedení je nutné navrhnout rámovou příčel o větší šířce v porovnání s předchozí variantou, avšak tento vliv nemá žádný dopad na únosnost spoje. Konkrétní šířka bude upřesněna až na základě samotné optimalizace rámu.

c) Analýza vybraných parametrů

Stejně jako u kruhového šroubovaného styčnicku, budou i u tohoto spoje ověřeny parametry t_1 , d a dále počet řad kolíků $n_{\text{ř}}$. Základní model je nastaven na stejné charakteristiky jako v předchozích případech a jedinou změnou je průměr ocelové kolíku, který byl navýšen na 30 mm. Počet řad spojovacích prvků byl stanoven na maximální možný, což odpovídá 80 kolíkům.

- Tloušťka vnějšího prvku: t_1

t_1	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
100 mm	80	28,37	37,15	0,76	0,9
160 mm	80	28,37	46,38	0,61	0,56
200 mm	80	28,37	53,97	0,53	0,45

Tab. 12 - Analýza šroubovaného styčnicku s vnitřní ocelovou deskou - tloušťka vnějšího prvku

Oproti předchozímu provedení je v tomto případě vliv tloušťky vnějšího prvku velmi zásadní a výrazně napomáhá zvýšit únosnost spoje a zároveň i redukovat využití na smyk. Hlavním důvodem je, že nedochází tak snadno k porušení, kdy se vytvoří plastický kloub a je možné plně využít pevnost v otláčení dřeva. Vložená ocelová deska zajistí, aby nedošlo k tak snadné deformaci kolíku, což je z hlediska statického působení velká výhoda. Toto využití je dále také možné díky tomu, že charakteristická únosnost není redukována vlivem dvou na sebe kolmých ortotropních prvků.

- Počet řad spojovacích prvků: $n_{\check{r}}$

$n_{\check{r}}$	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
4	40	47,91	42,83	1,12	0,59
6	60	37,72	42,87	0,81	0,62
8	80	28,37	42,91	0,66	0,65

Tab. 13 - Analýza šroubovaného styčnicku s vnitřní ocelovou deskou - počet řad spojovacích prvků

Výsledek rozboru je shodný s kruhovým šroubovaným styčnickem. Hlavním vlivem tohoto parametru je snížení hodnot působících vnitřních sil přidáním počtu ocelových kolíků. Toto řešení je nejefektivnější, avšak je nutné počítat s výraznými náklady. V případě, že bude přidáním násobku řad spoj málo využitý, je dále možné snížit počet kolíků v řadě.

- Průměr spojovacího prvku: d

d	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
20 mm	80	24,4	30,08	0,81	0,71
24 mm	80	26,48	35,17	0,75	0,72
30 mm	80	28,37	42,91	0,66	0,65

Tab. 14 - Analýza šroubovaného styčnicku s vnitřní ocelovou deskou - průměr spojovacího prvku

Zmenšením průměru kolíků dochází ke snížení únosnosti, ale díky změně minimálních vzdáleností zároveň klesá i hodnota výslednice sil. Nedochozí tedy k tak výraznému nárůstu využití únosnosti a v porovnání s kruhovým styčnickem zde platí určitá úměra. Geometrie kruhového styčnicku byla při návrhu již zcela na okraji průřezu a proto byl zaznamenán negativní dopad na zvětšení průměru d .

3.3 Vyhodnocení analýzy a souhrn nejdůležitějších parametrů

Na základě rozboru dvou velmi podobných spojů v rámovém rohu byly zjištěny nejdůležitější parametry, které jsou zásadní pro vhodný návrh a celkovou optimalizaci. Obě varianty jsou velmi podobné a liší se především geometrií spojovacích prvků a také typem středového tělesa. První varianta je navržena jako spoj dřevo - dřevo a druhá

způsobem dřevo - ocel. Porovnáním těchto dvou provedení byly zjištěny výrazné výhody z hlediska porušení spoje. V případě vložené ocelové desky nedochází tak snadno k vytvoření plastických kloubů a je patrná výrazně vyšší únosnost.

3.3.1 Souhrn analyzovaných parametrů

Hlavní hodnocené parametry byly průměr spojovacího prvku, tloušťka vnějšího tělesa a obecně geometrie spoje, jejíž vyhodnocení se o obou případech lišilo a není tedy přímo porovnatelné.

1. Tloušťka vnějšího prvku t_1

V případě kruhového šroubovaného styčnicku neměl tento parametr příliš velký dopad na celkovou únosnost spoje a byly zaznamenány změny především u menších hodnot, které by patrně nebyly použitelné pro funkční rámovou konstrukci.

Naopak u styčnicku s vloženou deskou se tento vliv projevil velmi výrazně. Tento parametr je velmi výhodný pro proces optimalizace a může být řešením v případě nevyhovujícího spoje. Mimo jiné má zvětšování průřezu také pozitivní vliv na únosnost ve smyku.

2. Průměr spojovacího prvku d

Ačkoliv by bylo možné očekávat pozitivní vliv na celkovou únosnost při zvětšení průměru spojovacího prvku, v případě kruhové styčnicku tomu tak není. Snížením počtu kolíků dojde k tak výraznému navýšení působících sil, že nárůst únosnosti tento vliv nepřeváží. Důvodem je především omezení kruhové geometrie, kvůli které zde neplatí úměrnost. Je tedy vhodné prověřit více možností a v krajním případě provést navýšení rozměrů konstrukčních prvků.

U styčnicku s vloženou ocelovou deskou působí změna tohoto parametru pozitivně a dochází úměrně ke snížení využití únosnosti i smyku.

3. Geometrie průřezu (poloměr r , počet řad spojovacích prvků n_r)

Pro zjednodušení analýzy a zavedení určitého limitujícího faktoru byl u styčnicku s vloženou ocelovou deskou zaveden systém počtu řad. U kruhového styčnicku byl zcela jasným faktorem geometrie poloměr od středu otáčení.

Obecně je geometrie nejefektivnějším způsobem optimálního návrhu a díky snížení složek působících sil je využití únosnosti redukováno velmi výrazně. U obou

případů je zaveden střed otáčení a důraz je kladen na to, aby byly všechny prvky umístěny na co největším rameně. Tímto dokážou takzvaně odebrat největší podíl působícího momentu, který je u rámových konstrukcí nejpodstatnější. Pro správnou optimalizaci by měl být tedy tento parametr zohledněn v první řadě.

3.3.2 Vyhodnocení vybraných spojů

Pomocí analytických modelů byly optimalizovány obě konstrukční řešení tak, aby byly co nejvíce shodné a bylo sjednoceno jejich využití únosnosti, které se pohybuje u obou variant okolo 98 %. V praktickém ohledu by nebyl takto hraniční návrh bezpečný a bylo by vhodné zachovat větší rezervu. Avšak pro účely teoretického rozboru je vhodné docílit maximálního využití obou spojů pro jejich objektivní porovnání.

Tímto způsobem byly vyhodnoceny 2 návrhy pro vypracování parametrických modelů. Zvolená řešení budou zkonstruována v následujícím provedení.

1. Kruhový šroubovaný styčník

- Materiálové provedení:

Ocelový kolík v pevnostní třídě 4.6, Lepené lamelové dřevo GL24h

- Konstrukční rozměry:

Stojka: $B = 2 \times 0,14 \text{ m}$, $H = 1,9 \text{ m}$; Příčel: $B = 0,2 \text{ m}$, $H = 2,1 \text{ m}$

- Spoj:

$d = 24 \text{ mm}$, $r_1 = 0,782 \text{ m}$, $r_2 = 0,662 \text{ m}$, $n_1 = 34$, $n_2 = 29$

t_1 (mm)	d (mm)	r_{max} (mm)	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
140	24	782	63	28,53	29,08	0,98	0,51

Tab. 15 - Kruhový šroubovaný styčník - návrh

2. Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

- Materiálové provedení:

Ocelový kolík v pevnostní třídě 4.6, Lepené lamelové dřevo GL24h

- Konstrukční rozměry:

Stojka: $B = 0,3 \text{ m}$, $H = 1,9 \text{ m}$; Příčel: $B = 0,3 \text{ m}$, $H = 2,1 \text{ m}$

- Spoj:

$$d = 24 \text{ mm}, n = 2 \times 60 \text{ (6 řad á 10)}$$

t_1 (mm)	d (mm)	r_{max} (mm)	n	F_d [kN]	$F_{v,RD}$ [kN]	$F_d / F_{v,RD}$	$\tau_v / f_{v,d}$
140	24	1710	60	32,88	32,98	0,99	0,69

Tab. 16 - Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - návrh

Z uvedeného vyplývá, že byly co nejvíce zachovány původní rozměry vybraného konstrukčního řešení a obou variant byla pouze upravena šířka rámové stojky. V případě kruhového styčníku došlo k rozdělení na 2 samostatné průřezy a u styčníku s vloženou deskou byla šířka navýšena o tloušťku vložené ocelové desky. Tato změna měla dopad také na šířku příčle, která musí být v tom konstrukčním provedení shodná. Poslední úpravou byla pevnostní třída dřeva, která byla snížena na levnější variantu GL24h, což je nejvíce používaný materiál.

U těchto dvou návrhů bude posouzena především tuhost spoje a s tím spojený vliv na prokluz a redistribuci ohybového momentu. Přesná geometrie bude specifikována v další části této práce.

4. Parametrické modely rámových rohů

Na základě uvedených návrhů budou v této části práce vytvořeny dva parametrické modely, u nichž bude zkoumána tuhost spoje a její vliv na konstrukční řešení. Výsledky tohoto rozboru budou následně využity pro celkovou finální optimalizaci konstrukce.

4.1 Parametrické modely a jejich geometrie

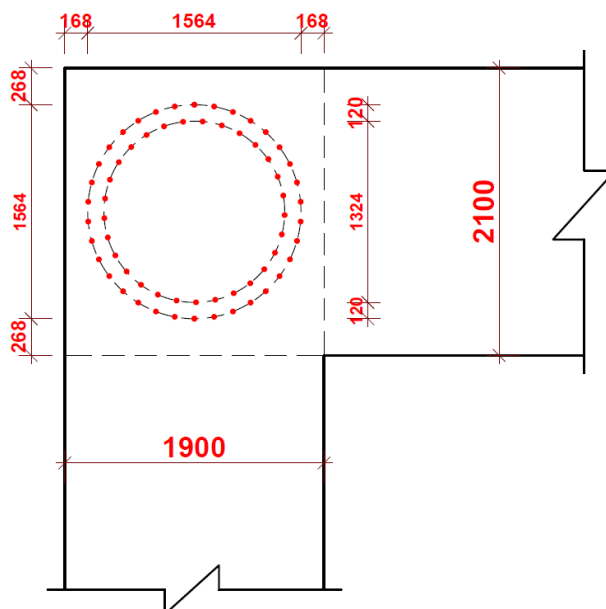
Pro určení odpovídající hodnoty tuhosti rámového rohu je nutné vyjádřit maximální deformaci spoje na základě působících vnitřních sil, které byly získány již v předchozích výpočtech. Vhodným řešením pro získání odpovídajících hodnot deformace je vytvoření parametrického modelu a následný výpočet pomocí metody konečných prvků. K tomuto účelu je vhodným nástrojem software Dlubal RFEM 5.16.1, v němž budou vytvořeny dva samostatné modely dle předchozího návrhu.

4.1.1 Geometrie navržených modelů

Geometrický návrh spoje vyplývá z minimálních normových vzdáleností mezi jednotlivými spojovacími prvky a tyto hodnoty závisí především na průměru prvku a dále na úhlu, který svírá výslednice sil se směrem vláken. Pro zajištění bezpečného návrhu bude uvažováno s maximálními možnými hodnotami.

a) Kruhový šroubovaný styčník

Kruhový spoj je tvořen ocelovými kolíky M24 v pevnostní třídě 4.6 o celkovém počtu 63 kusů, z nichž 34 leží na vnější kružnici a 29 na kružnici vnitřní. Vnější kružnice je navržena o poloměru 782 mm a vnitřní o poloměru 662 mm. Konstrukční prvky jsou navrženy z lepeného lamelového dřeva v pevnostní třídě GL24h. Geometrie spoje je dále specifikována na následujícím schématu.



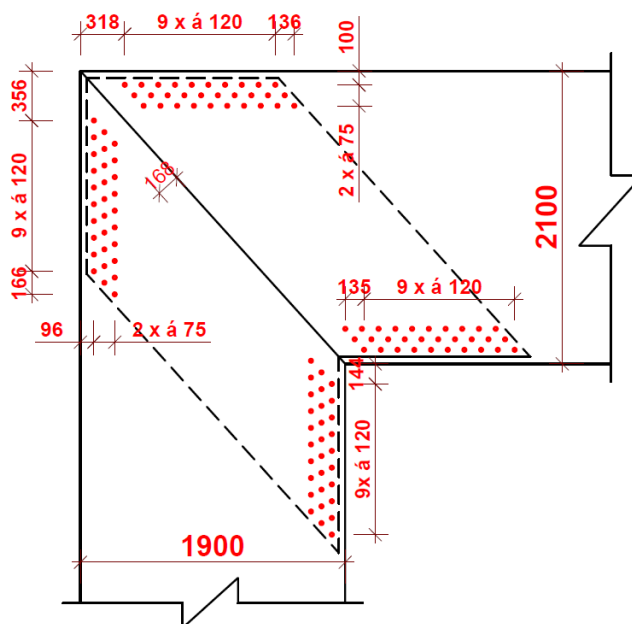
Obr. 53- Kruhový šroubovaný styčník - geometrie spoje

b) Styčník s vloženou ocelovou deskou

Pro druhý návrh spoje jsou také použity ocelové kolíky M24 v pevnostní třídě 4.6, avšak jejich počet je výrazně vyšší. Kvůli vložené ocelové desce, která působí jako vložený element, je nutné provést spoj oboustranně tak, aby byl zajištěn účinný přenos všech vnitřních sil. Z tohoto důvodu je použito celkově 120 spojovacích prvků, z nichž 60 leží na straně příčle a 60 na straně stojky.

Dále je spoj opatřen ocelovou deskou tl. 20 mm z oceli pevnostní třídy S235 a

konstrukční prvky jsou tvořeny lepeným lamelovým dřevem GL24h, stejně jako u předchozí varianty. Bližší specifikace geometrie je vyjádřena následujícím schématem.



Obr. 54- Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou - geometrie spoje

4.1.2 Parametrické modely MKP

Pomocí softwaru Dlubal RFEM 5.16.1 byly vytvořeny dva 3D modely, u kterých bylo simulováno konstrukční řešení rámového rohu. Pro zavedení skutečných vnitřních sil, které v tomto místě působí, bylo vytvořeno tuhé rameno, díky kterému vzniká ve středu spoje odpovídající ohybový moment. V modelu jsou tedy použity pouze svislé a vodorovné silové složky, a jejich hodnoty jsou přepočítány na plochu průřezu, aby nedošlo pouze k bodovému zatížení, což by neodpovídalo skutečnosti.

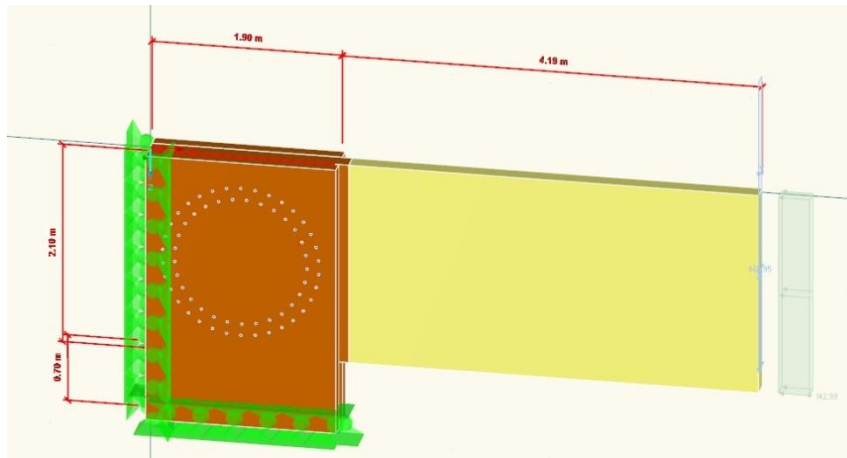
Dále je vytvořeno podepření rámové stojky oboustranným vetknutím, což zamezí celkovému ohybu rámového rohu a bude možné vyčíslit deformaci, kterou umožňuje samostatný spoj.

Důležitým vlivem je dále také nastavení sítě pro výpočet pomocí metody konečných prvků. Po postupném rozboru přesnosti výsledků byla hustota sítě určena na hodnotu 0,05 m u analyzovaných částí a u tuhé rameno na 0,25 m, což je nezbytné pouze pro funkčnost modelu.

Veškeré výpočty jsou provedeny podle teorie I. řádu a je nastaveno elastické chování. V následujícím grafickém vyhodnocení budou uvedeny základní parametrické modely, nastavení sítě modelu a dále hodnoty deformace u_x , u_z a ϕ_y .

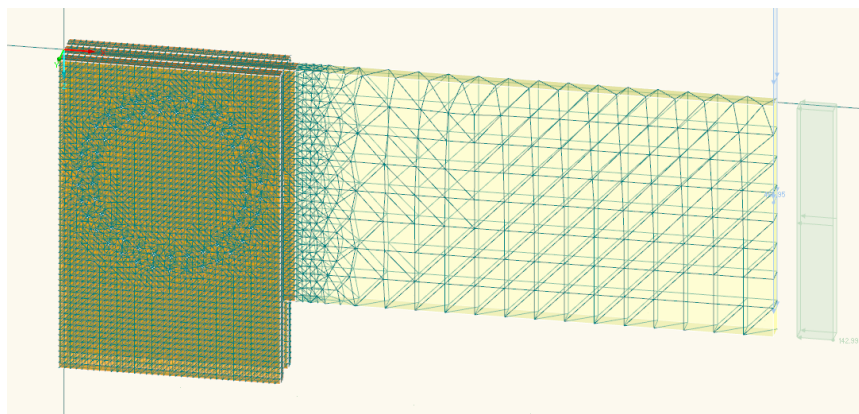
a) Kruhový šroubovaný styčník

- ZÁKLADNÍ MODEL:



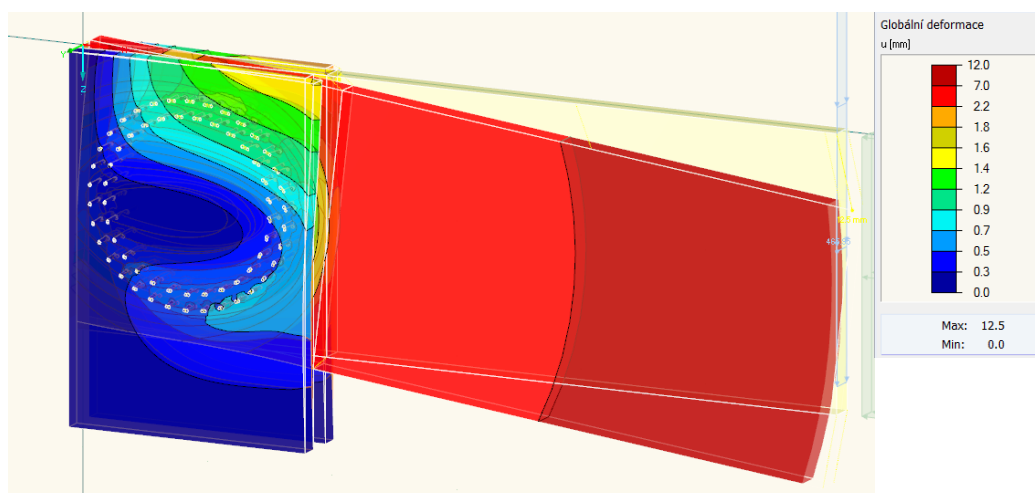
Obr. 55- Parametrický model 1 - základní model

- SÍŤ MKP:



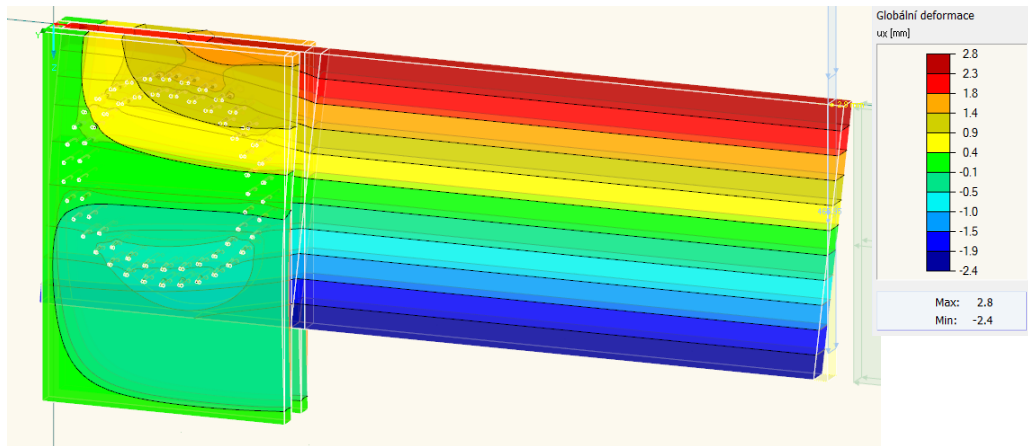
Obr. 56- Parametrický model 1 - síť MKP

- CELKOVÁ DEFORMACE U_{tot} :



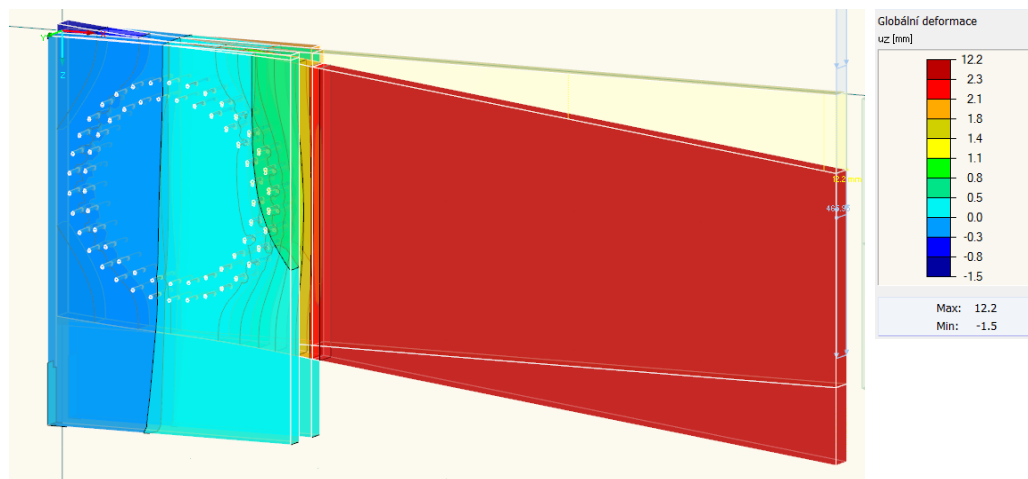
Obr. 57- Parametrický model 1 - celková deformace u_{tot}

- VODOROVNÁ DEFORMACE U_x :



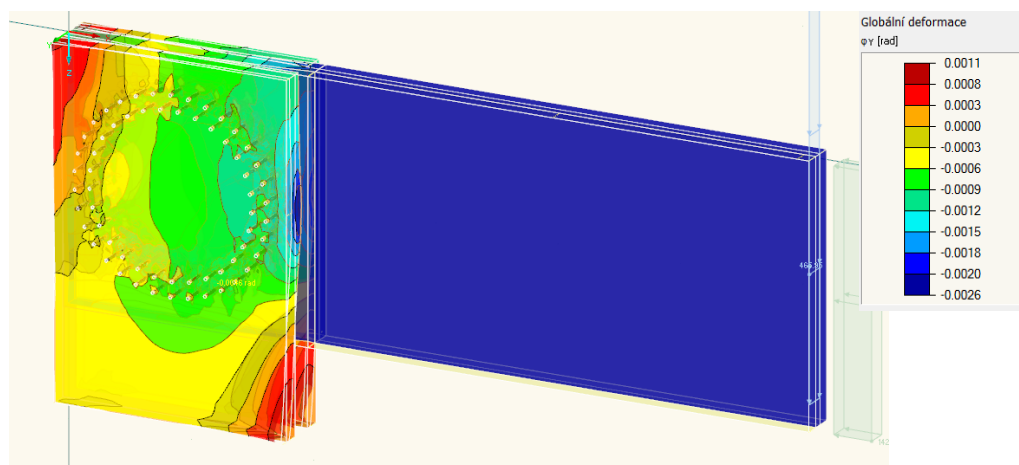
Obr. 58- Parametrický model 1 - vodorovná deformace u_x

- SVISLÁ DEFORMACE U_z :



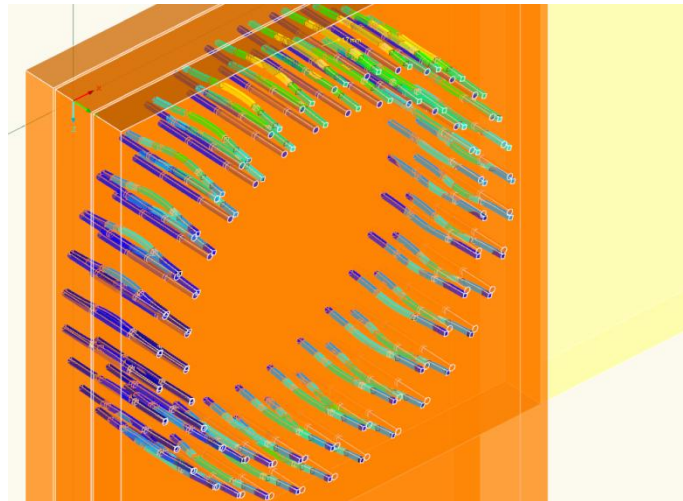
Obr. 59- Parametrický model 1 - svislá deformace u_z

- POTOČENÍ ϕ_y :



Obr. 60- Parametrický model 1 - potočení ϕ_y

- DETAIL DEFORMACE OCELOVÝCH KOLÍKŮ:



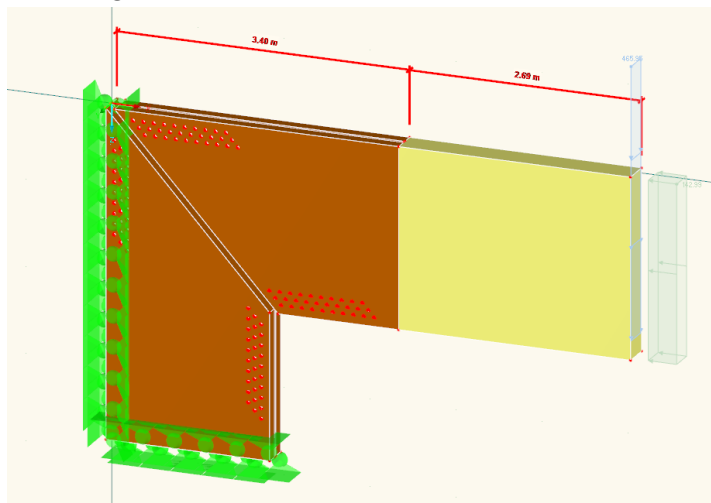
Obr. 61- Parametrický model 1 - detail deformace kolíků

Na základě uvedených výsledků deformací byly vyhodnoceny tyto maximální hodnoty v místě střednice. Všechny výsledky nejsou přesně patrné z grafických výstupů a některé hodnoty byly upřesněny odečtením pomocí softwaru.

- Maximální vodorovná deformace: $u_{x,max} = 0,3 \text{ mm}$
- Maximální svislá deformace: $u_{z,max} = 0,15 \text{ mm}$
- Maximální pootočení: $\phi_{y,max} = 0,001 \text{ rad}$

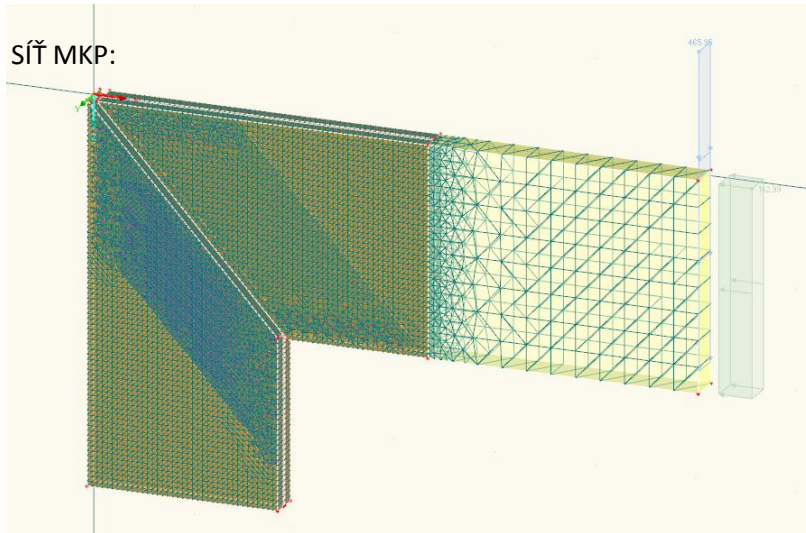
b) Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

- ZÁKLADNÍ MODEL:



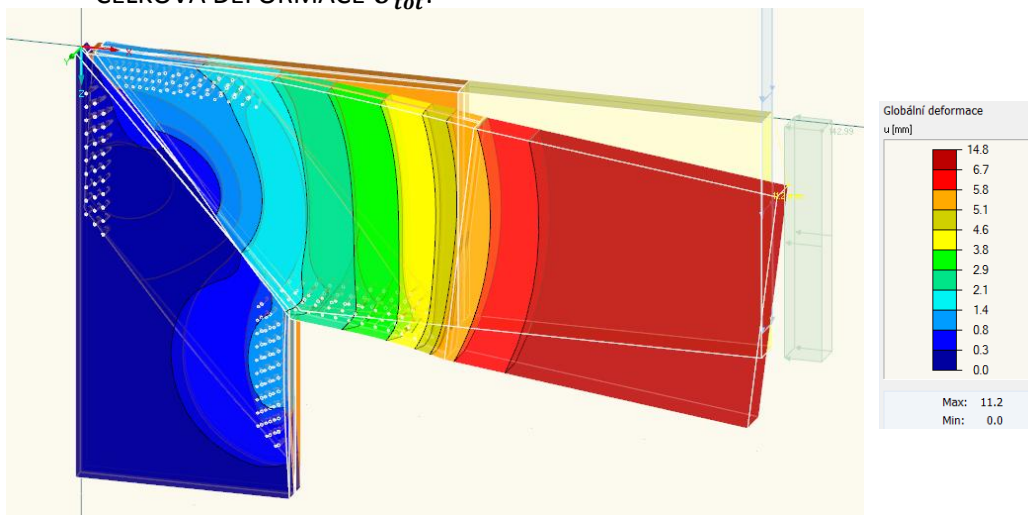
Obr. 62- Parametrický model 2 - základní model

- SÍŤ MKP:



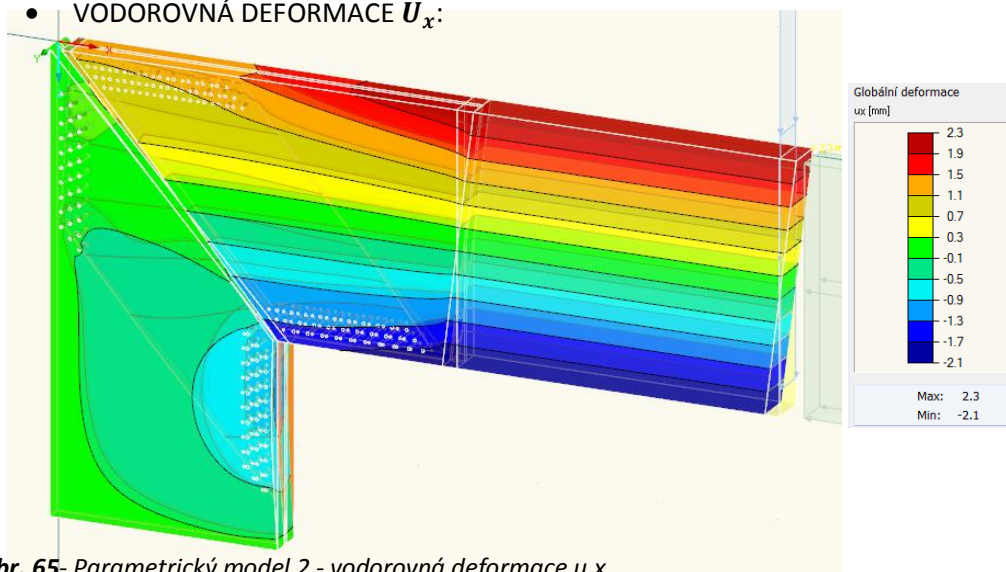
Obr. 63- Parametrický model 2 - síť MKP

- CELKOVÁ DEFORMACE U_{tot} :



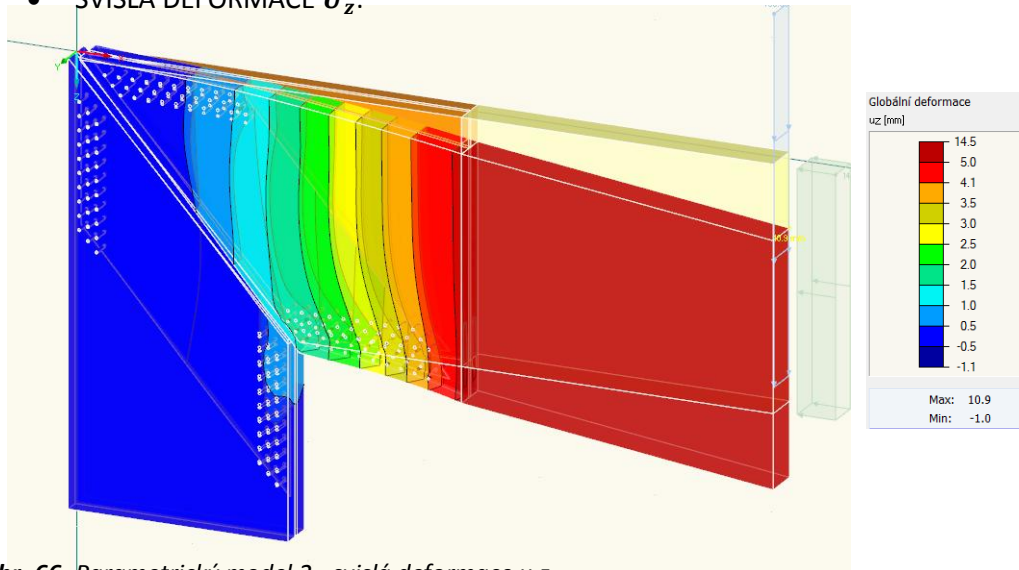
Obr. 64- Parametrický model 2 - celková deformace u_{tot}

- VODOROVNÁ DEFORMACE U_x :



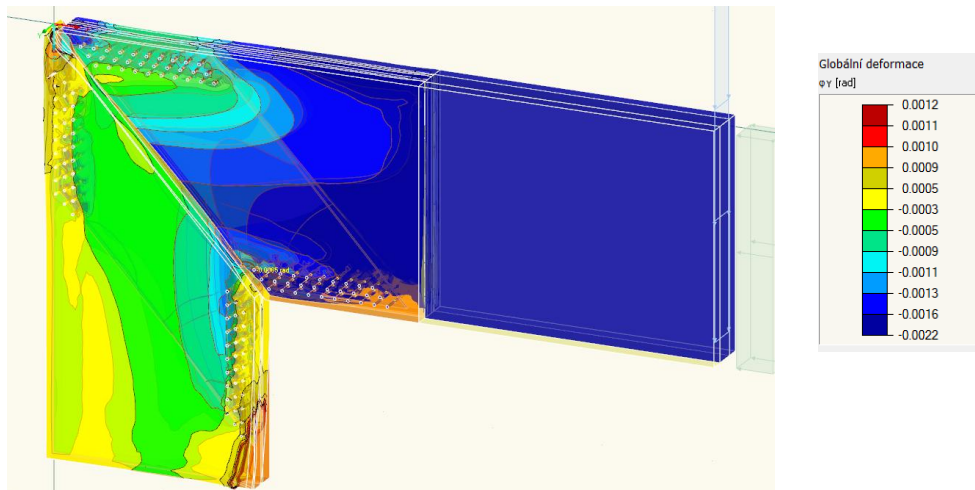
Obr. 65- Parametrický model 2 - vodorovná deformace u_x

- SVISLÁ DEFORMACE U_z :



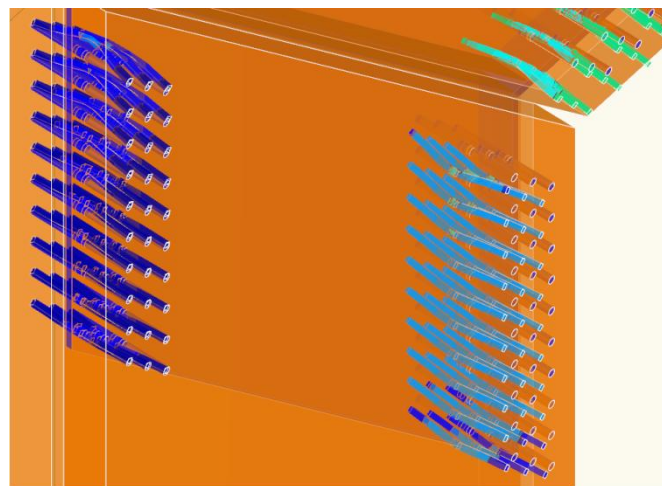
Obr. 66- Parametrický model 2 - svislá deformace u,z

- POTOČENÍ ϕ_y :



Obr. 67- Parametrický model 2 - potočení ϕ,y

- DETAIL DEFORMACE OCELOVÝCH KOLÍKŮ:



Obr. 68- Parametrický model 2 - detail deformace kolíků

Z uvedených výsledků byly vyhodnoceny následující hodnoty maximálních deformací, které byly odečteny ze střednice.

- Maximální vodorovná deformace: $u_{x,max} = 0,2 \text{ mm}$
- Maximální svislá deformace: $u_{z,max} = 0,5 \text{ mm}$
- Maximální pootočení: $\phi_{y,max} = 0,0017 \text{ rad}$

U tohoto typu rámového rohu se projevují velmi podobné deformace ve svislém a vodorovném směru. Hodnota maximálního pootočení je však téměř dvojnásobná, což je způsobeno především přechodem na ocelový mezilehlý prvek, který je připojen oboustranně. Tímto dochází k prokluzu spoje na dvou místech a tuhost se tak výrazně redukuje.

V případě druhého řešení bylo zanedbáno spolupůsobení rámové příčle a stojky a byla vytvořena dilatace tak, aby v rámci modelu nebylo počítáno s kontaktem těles. V rámci porovnání těchto dvou variant je to nezbytné opatření, které by mělo velmi výrazný vliv na celkový výsledek.

Do modelů byly zavedeny maximální působící síly, které vycházejí z předchozího výpočtu rámové konstrukce $N = 54,05 \text{ kN}$ a $V = 176,13 \text{ kN}$. Posouvající síla díky ramenu 5,143 m vytvořila ohybový moment $M = 905,84 \text{ kNm}$, čímž byly dosaženo požadované zatížení ve styčnicku.

Na základě vyhodnocených deformací budou následně vyjádřeny hodnoty tuhostí, které budou zohledněny v původním 2D modelu rámové konstrukce. Tímto dojde k zohlednění redistribuce momentu, což je u ráků typická problematika.

4.2 Vyhodnocení tuhosti spoje

Tuhost jako podíl působící silové složky a deformace je možné vyjádřit kromě numerické analýzy také na základě normy ČSN EN 1995-1-1, kde jsou uvedeny vztahy pro výpočet různých spojovacích prvků. V této části práce bude kromě vyhodnocení předchozích výsledků provedeno také porovnání s normovými hodnotami a následně se experimentálně určená tuhost zohlední v celkovém návrhu.

4.2.1 Výpočet tuhosti

Tuhost charakterizovaná modulem prokluzu K_{ser} se určuje v závislosti na fázi životnosti konstrukce. Je nutné zohlednit vliv dotvarování dřevěných prvků a provést výpočet také na konci životnosti v čase $t = \infty$. Kromě experimentálního vyjádření bude tuhost ověřena také pomocí normy, kde jsou však uvedené vztahy pouze pro vyjádření ohybové tuhosti. Dále je nutné rozlišovat tyto hodnoty pro mezní stavy únosnosti a použitelnosti. V případě tohoto rozboru však bude vyhodnocena a porovnána pouze základní hodnota pro MSP u obou typů zvolených styčníků.

a) Kruhový šroubovaný styčník

1. Experimentální určení

Vyhodnocení tuhosti bude provedeno na základě vztahů specifikovaných již v předchozí části této práce a budou dosazeny výsledky z parametrického modelu.

V čase $t = 0$:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,x} = \frac{N}{u_{,x,max}} = \frac{54,05}{0,3} = \mathbf{180,16 \text{ MN/m}}$
- Tuhost ve svislém směru: $K_{,z} = \frac{V}{u_{,z,max}} = \frac{176,13}{0,15} = \mathbf{1174,2 \text{ MN/m}}$
- Tuhost v ohybu: $K_{,\varphi} = \frac{M_{,y}}{\phi_{y,max}} = \frac{905,84 \times 0,001}{0,001} = \mathbf{905,84 \text{ MNm/rad}}$

Pro uplatnění těchto hodnot do návrhu dle MSÚ je nutné vyjádřit všechny hodnoty podle následujícího vztahu: [16] $K_{,u} = \frac{2}{3} \times K_{,i}$

Pro MSÚ tedy platí:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,u,x} = \frac{2}{3} \times K_{,x} = \frac{2}{3} \times 180,16 = \mathbf{120,11 \text{ MN/m}}$
- Tuhost ve svislém směru: $K_{,u,z} = \frac{2}{3} \times K_{,z} = \frac{2}{3} \times 1174,2 = \mathbf{782,8 \text{ MN/m}}$
- Tuhost v ohybu: $K_{,u,\varphi} = \frac{2}{3} \times K_{,\varphi} = \frac{2}{3} \times 905,84 = \mathbf{603,89 \text{ MNm/rad}}$

V čase $t = \infty$:

Aby bylo možné vyjádřit experimentálně vliv dotvarování, budou do

výpočtového modelu zavedeny redukované materiálové charakteristiky dle ČSN EN 1995. [16] Redukce pro MSP je vyjádřena následovně: [16]

$$E_{0,mean,fin} = \frac{E,mean}{(1+k,def)} = \frac{11600}{(1+0,6)} = \mathbf{7250 MPa}$$

$$E_{90,mean,fin} = \frac{E,90,mean}{(1+k,def)} = \frac{390}{(1+0,6)} = \mathbf{243,75 MPa}$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G,mean}{(1+k,def)} = \frac{720}{(1+0,6)} = \mathbf{450 MPa}$$

Hodnota ***k, def*** vyjadřuje součinitel dotvarování a pro lepené lamelové dřevo je rovna 0,6 pro první třídu provozu. Ostatní neznámé jsou materiálové charakteristiky specifikované dle ČSN EN 1995-1-1. [16] Určené hodnoty budou zavedeny do výpočtového modelu a následně budou vyjádřeny nové deformace.

- Maximální vodorovná deformace: $u_{x,max} = \mathbf{0,6 mm}$
- Maximální svislá deformace: $u_{z,max} = \mathbf{0,45 mm}$
- Maximální pootočení: $\phi_{y,max} = \mathbf{0,0013 rad}$

Hodnoty tuhosti na konci životnosti jsou pak vyjádřeny následovně:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,x} = \frac{N}{u_{x,max}} = \frac{54,05}{0,6} = \mathbf{90,08 MN/m}$

- Tuhost ve svislém směru: $K_{,z} = \frac{V}{u_{z,max}} = \frac{176,13}{0,45} = \mathbf{391,4 MN/m}$

- Tuhost v ohybu: $K_{,\varphi} = \frac{M,y}{\phi_{y,max}} = \frac{905,84 \times 0,001}{0,0013} = \mathbf{696,8 MNm/rad}$

Tuhost na konci životnosti velmi zásadně poklesla, což se reálně projeví například na průhybu konstrukce.

2. Vyjádření dle ČSN EN 1995

V čase $t = 0$:

- Tuhost spojovací prvku: $K_{ser} = \rho_m^{1,5} \times \frac{d}{23} = 380^{1,5} \times \frac{24}{23} = \mathbf{7729,6 N/mm}$

Uvedená hodnota platí pro jeden stříh jednoho spojovacího prvku. Pro výpočet se tedy dále bude používat dvojnásobek.

- Tuhost v ohybu:

$$K_{r,\phi} = 0,85 \times \sum K_{ser} \times r_i^2 = 0,85 \times 7729,6 \times 2 \times (34 \times 782^2 + 29 \times 662^2) \times 10^{-9} = 440,21 \text{ MNm/rad}$$

Z uvedeného výpočtu vyplývá, že návrh dle normy je velmi konzervativní a hodnota tuhosti pro ten spoj je přibližně poloviční. Je nutné brát v potaz, že redukce 0,85 byla dosazena na základě DIN 1052 a nemusí být tedy uvažována.

V čase $t = \infty$:

- Tuhost v ohybu:

$$K_{r,\phi,fin} = 0,85 \times \sum \frac{K_{ser}}{(1+\psi_2 \times k_{def})} \times r_i^2 = \frac{440,21}{(1+0,6)} = 275,13 \text{ MNm/rad}$$

Vzhledem k tomu, že zatížení je z většiny tvořeno sněhem a větrem, bude součinitel ψ_2 nahrazen hodnotou 1, což odpovídá ČSN EN 1990. [32]

Podle vyjádřených hodnot je tedy patrné, že postup dle normy je použitelný, ale zahrnují velmi vysokou rezervu. Pro další vyjádření budou tedy použity hodnoty získané z výpočtového modelu.

b) Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

Výpočet tuhosti bude proveden stejným způsobem jako u předchozí varianty rámového rohu.

1. Experimentální určení

V čase $t = 0$:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,x} = \frac{N}{u_{x,max}} = \frac{54,05}{0,2} = 270,25 \text{ MN/m}$
- Tuhost ve svislém směru: $K_{,z} = \frac{V}{u_{z,max}} = \frac{176,13}{0,5} = 352,26 \text{ MN/m}$
- Tuhost v ohybu: $K_{,\phi} = \frac{M_{,y}}{\phi_{y,max}} = \frac{905,84 \times 0,001}{0,0017} = 532,84 \text{ MNm/rad}$

Hodnoty pro výpočet MSÚ:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{,u,x} = \frac{2}{3} \times K_{,x} = \frac{2}{3} \times 270,25 = 180,16 \text{ MN/m}$

- Tuhost ve svislém směru: $K_{u,z} = \frac{2}{3} \times K_{z,z} = \frac{2}{3} \times 352,26 = 234,84 \text{ MN/m}$
- Tuhost v ohybu: $K_{u,\varphi} = \frac{2}{3} \times K_{\varphi,\varphi} = \frac{2}{3} \times 532,84 = 355,22 \text{ MNm/rad}$

V čase $t = \infty$:

K tomuto výpočtu budou opět zjištěny hodnoty deformací na konci životnosti pomocí parametrického modelu. Redukce materiálových charakteristik je totožná s předchozím vyjádřením.

- Maximální vodorovná deformace: $u_{x,max} = 0,5 \text{ mm}$
- Maximální svislá deformace: $u_{z,max} = 0,9 \text{ mm}$
- Maximální pootočení: $\phi_{y,max} = 0,0021 \text{ rad}$

Hodnoty tuhosti na konci životnosti konstrukce:

- Tuhost ve vodorovném směru: $K_{x,x} = \frac{N}{u_{x,max}} = \frac{54,05}{0,5} = 108,1 \text{ MN/m}$
- Tuhost ve svislém směru: $K_{z,z} = \frac{V}{u_{z,max}} = \frac{176,13}{0,9} = 195,7 \text{ MN/m}$
- Tuhost v ohybu: $K_{\varphi,\varphi} = \frac{M_y}{\phi_{y,max}} = \frac{905,84 \times 0,001}{0,0021} = 431,35 \text{ MNm/rad}$

2. Vyjádření dle ČSN EN 1995

Vzhledem k rozdělení tuhosti mezi oboustranný spoj není toto určení podle normy možné a byly by případně vyhodnoceny pouze velmi orientační hodnoty, které by nebyly žádným přínosem v rámci této práce. Předpoklad vyjádření je takový, že by bylo třeba výslednou hodnotu pro jednu stranu celého spoje redukovat přibližně na 60 %. Tento odhad je však pouze orientační a určení normové hodnoty není cílem této práce.

Z uvedených výpočtů vyplývá, že kruhový šroubovaný styčník je z hlediska tuhosti výrazně efektivnější. Kvůli vloženému komponentu a oboustrannému spoji u druhé varianty je tuhost velmi redukována a toto řešení se tedy nejeví jako příliš vhodné pro další optimalizaci.

Díky rozboru byly také porovnány rozdíly s normovými hodnotami, které jsou velmi konzervativní a pro další návrh tedy nebudou využity.

Na základě experimentálně určených tuhostí bude dále vyjádřena redistribuce ohybových momentů na celé rámové konstrukci pro mezní stav únosnosti.

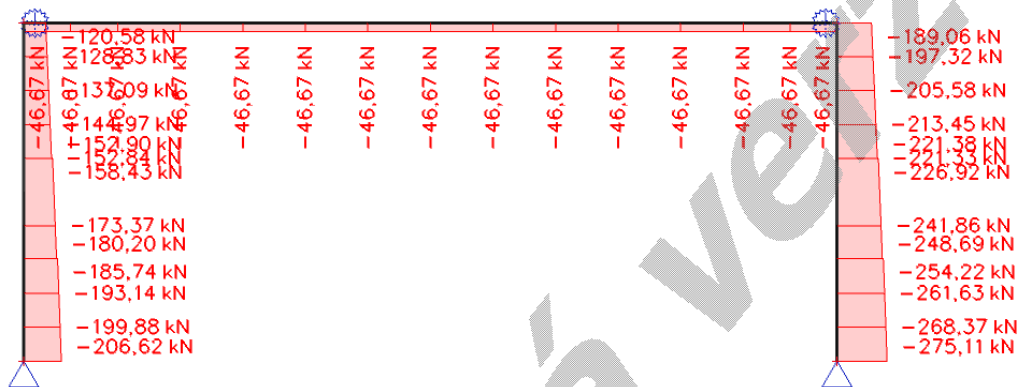
4.2.2 Vliv tuhosti na prokluz spoje

S použitím výsledků z předchozí části budou vygenerovány hodnoty vnitřních sil M , N , V pro mezní stav únosnosti a dále hodnoty průhybu pro mezní stav použitelnosti v čase $t = 0$ a $t = \infty$. Mezní stav použitelnosti je uvažován dle ČSN EN 1990. [32]

a) Kruhový šroubovaný styčnick

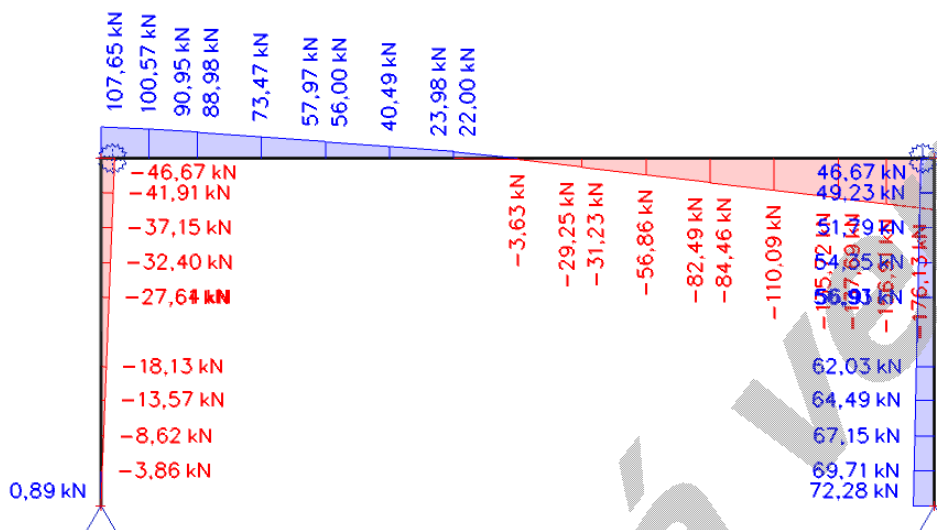
1. Mezní stav únosnosti

- NORMÁLOVÁ SÍLA N :



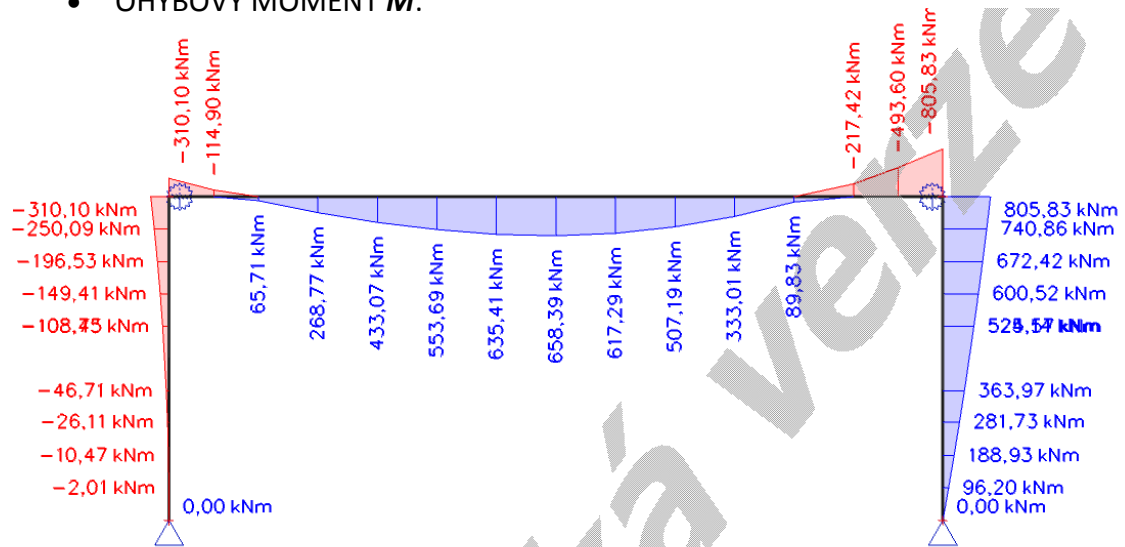
Obr. 69- Vliv prokluzu spoje 1 - normálová síla

- POSOUVAJÍCÍ SÍLA V :



Obr. 70- Vliv prokluzu spoje 1 - posouvající síla

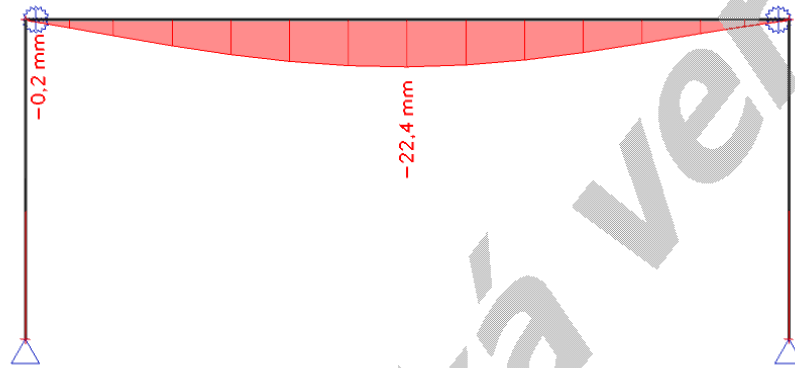
- OHYBOVÝ MOMENT M :



Obr. 71- Vliv prokluzu spoje 1 - ohybový moment

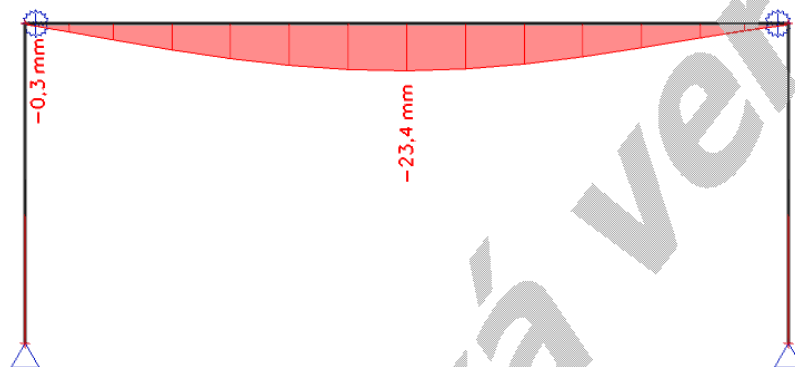
2. Mezní stav použitelnosti

- PRŮHYB V ČASE $t = 0$:



Obr. 72- Vliv prokluzu spoje 1 - průhyb $t = 0$

- PRŮHYB V ČASE $t = \infty$:



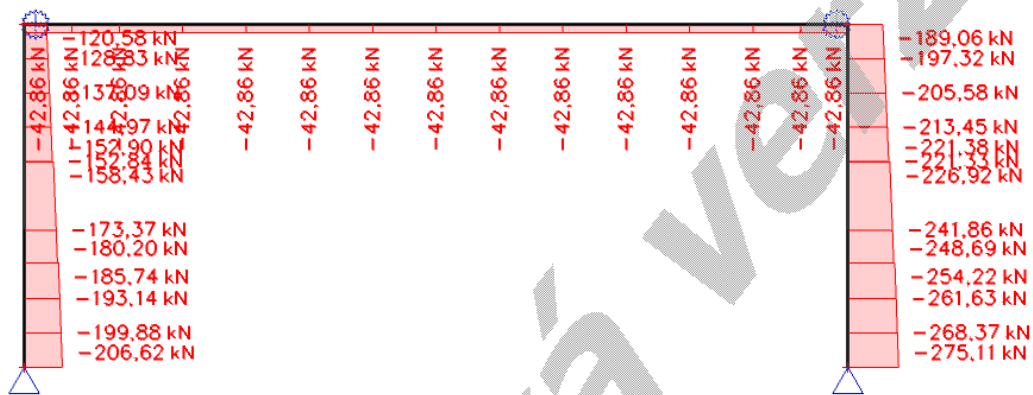
Obr. 73- Vliv prokluzu spoje 1 - průhyb $t = \infty$

V porovnání s původními hodnotami vnitřních sil došlo v případě **N** k lehkému poklesu v rámové příčli a v případě **V** k poklesu v rámové stojce. Zásadní je však především změna ohybového momentu **M**, kde proběhla redistribuce o 100 kNm. Dále je patrný vliv tuhosti rámového rohu na průhyb konstrukce, který však na začátku i konci životnosti vychází ve velmi příznivých hodnotách.

b) Šroubovaný styčník s vnitřní ocelovou deskou

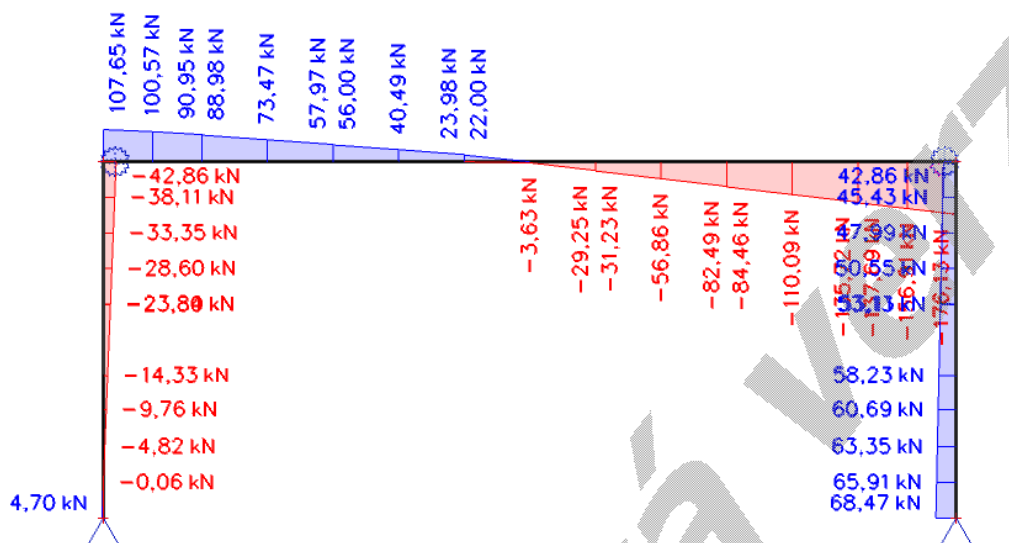
1. Mezní stav únosnosti

- NORMÁLOVÁ SÍLA **N**:



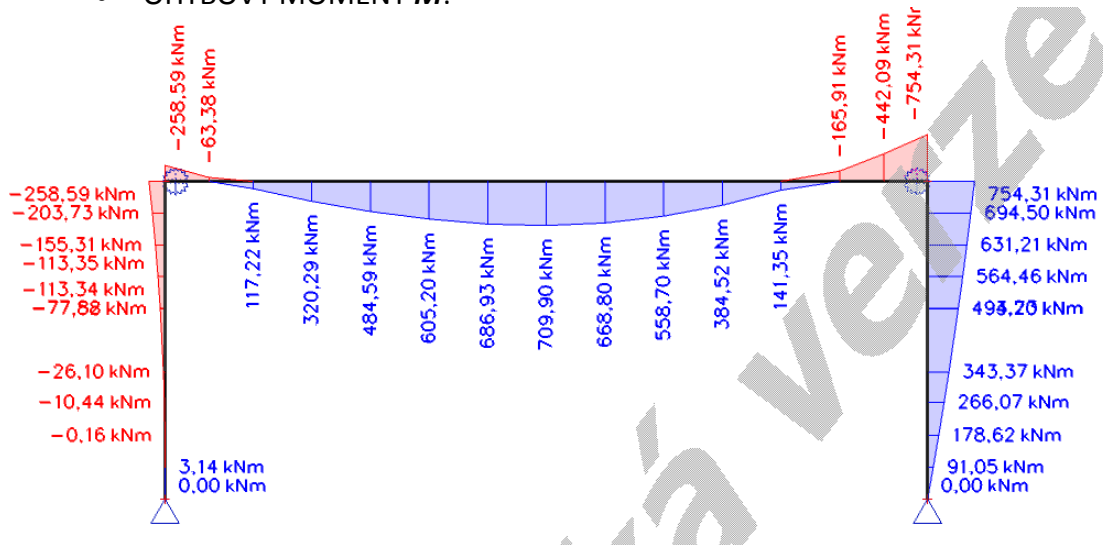
Obr. 74- Vliv prokluzu spoje 2 - normálová síla

- POSOUVAJÍCÍ SÍLA **V**:



Obr. 75- Vliv prokluzu spoje 2 - posouvající síla

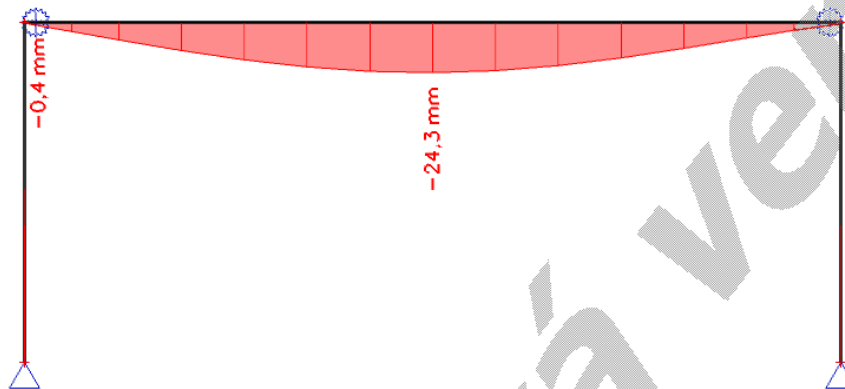
- OHYBOVÝ MOMENT M :



Obr. 76- Vliv prokluzu spoje 2 - ohybový moment

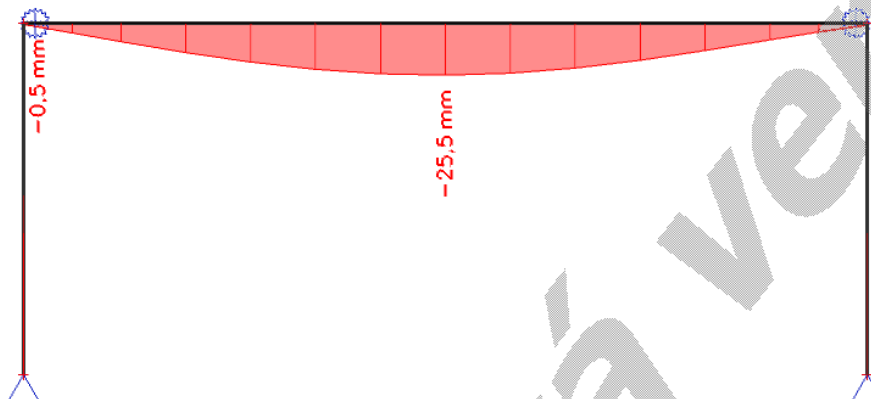
2. Mezní stav použitelnosti

- PRŮHYB V ČASE $t = 0$:



Obr. 77- Vliv prokluzu spoje 2 - průhyb $t = 0$

- PRŮHYB V ČASE $t = \infty$:



Obr. 78- Vliv prokluzu spoje 2 - průhyb $t = \infty$

U styčnicku s vloženou ocelovou deskou je redistribuce ohybového momentu podstatně výraznější a její hodnota je přibližně 150 kNm. Ostatní vnitřní síly se naopak ještě více snížily, ale vlivem nižší tuhosti došlo k nárůstu průhybu.

Porovnáním tuhosti byl celkově jako výhodnější návrh vyhodnocen spoj s kruhovým šroubovaným styčnickem, u kterého je méně výrazný vliv prokluzu spoje a redistribuce ohybového momentu. Tím nevzniká tak výrazná ohybová hodnota uprostřed pole příčle a jsou menší projevy průhybu.

Předpokládá se však, že rámová příčel bude navržena v konstantním průřezu, který určuje už samostatný rohový spoj. Vzhledem k téměř vyrovnaným hodnotám momentu by byla bez problému použitelná i méně tuhá varianta. Celkové vyhodnocení bude provedeno v následující části.

5. Optimalizace rámové konstrukce

Pro využití předchozího teoretického rozboru bude proveden návrh a optimalizace zkoumané rámové konstrukce a následně bude vyhodnocena materiálová úspora v porovnání s původní variantou. Na základě zkoumání únosnosti a tuhosti u dvou odlišných variant bylo provedeno vyhodnocení.

Z hlediska únosnosti jsou použitelné oba typy spojů, avšak v případě styčnicku s vloženou ocelovou deskou je třeba počítat s dvojnásobným počtem spojovacích prvků, což je značně neekonomické. S tímto aspektem souvisí také nutnost použití rozměrné ocelové desky a složitější montáž na staveništi.

V porovnání tuhosti také zcela jednoznačně obstál kruhový šroubovaný styčnick, u něžž byly vypočítány přibližně dvojnásobné hodnoty. Hlavním důvodem je nutnost oboustranného připojení v případě druhého provedení.

Ze zmíněných důvodů byl pro návrh rámové konstrukce vybrán kruhový styčnick a bude tedy zachováno provedení, které bylo již použito u stávající sportovní haly.

5.1 Návrh a posouzení

Na základě předchozího vyhodnocení bude navržena a posouzena rámová příčel, rámová stojky a jejich rohový spoj, který bude využit z předchozího rozboru.

5.1.1 Specifikace konstrukce

Kruhový šroubovaný styčník se osvědčil jako zcela vyhovující řešení a bude tedy využit i pro následující návrh ve stejné geometrii. Ke změnám dojde pouze u konstrukčních prvků, kde budou upraveny rozměry a materiálové provedení. K optimalizaci těchto částí byl využit opět Microsoft Office Excel a bylo navrženo řešení s využitím okolo 85 %. Tento výstup však nebude vzhledem k rozsahu práce uveden a bude pouze uveden optimalizovaný návrh a proveden statický posudek. Optimalizace u rámové stojky byla velmi omezena kvůli kotvení v patě a dále úpravu limitoval rohový spoj. Tento prvek tedy zůstává v podobných konstrukčních rozměrech a byl pouze rozdělen průřez na dva samostatné kusy. V následujícím souhrnu je specifikováno navržené optimalizované provedení.

- Materiálové provedení:

1. Ocelový kolík: pevnostní třída 4.6,

2. Konstrukční prvky: lepené lamelové dřevo GL24h

- Konstrukční rozměry:

1. Stojka: $B = 2 \times 0,14 \text{ m}$, $H_1 = 1,9 \text{ m}$, $H_2 = 1,4 \text{ m}$

2. Příčel: $B = 0,16 \text{ m}$, $H = 1,9 \text{ m}$

- Spoj:

$d = 24 \text{ mm}$, $r1 = 0,782 \text{ m}$, $r2 = 0,662 \text{ m}$, $n1 = 34$, $n2 = 29$

Vzhledem ke stejnému geometrickému provedení spoje a zachování materiálových charakteristik budou převzaty hodnoty tuhosti z předchozího rozboru. Zatížení konstrukce zůstává také beze změny a změna vlastní tíhy je automaticky vypočítána v softwaru Scia engineer 17.1. Jednotlivé tuhosti pro výpočet jsou uvedeny v následujícím souhrnu.

- **MSÚ:**

- Tuhost ve vodorovném směru: **$K_x = 120,11 \text{ MN/m}$**

- Tuhost ve svislém směru: **$K_z = 782,8 \text{ MN/m}$**

- Tuhost v ohybu: **$K_\varphi = 603,89 \text{ MNm/rad}$**

- **MSP:**

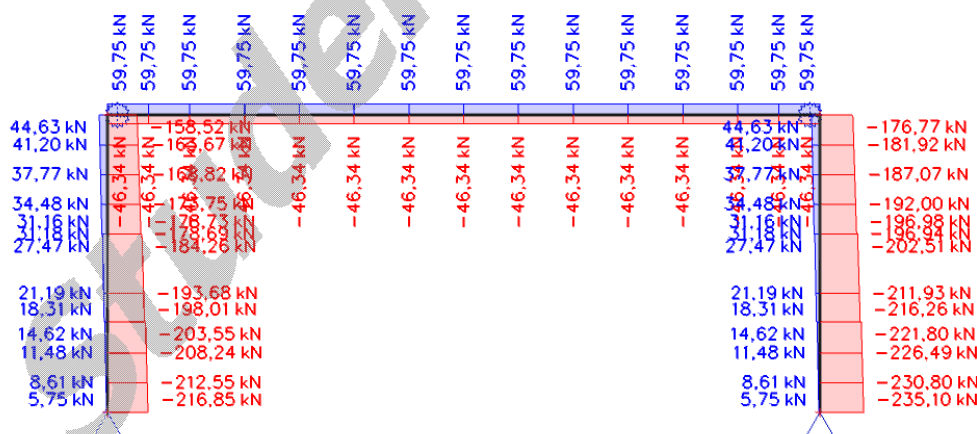
- Tuhost ve vodorovném směru: **$K_x = 180,16 \text{ MN/m}$**

- Tuhost ve svislém směru: $K_z = 1174,2 \text{ MN/m}$
- Tuhost v ohybu: $K_\varphi = 905,84 \text{ MNm/rad}$

Po zahrnutí změn průřezů a aplikaci hodnot tuhosti byly přepočítány vnitřní síly a maximální průhyby. V následujících grafických výstupech je uvedena obálka únosnosti MSÚ a dále maximální svislé deformace MSP.

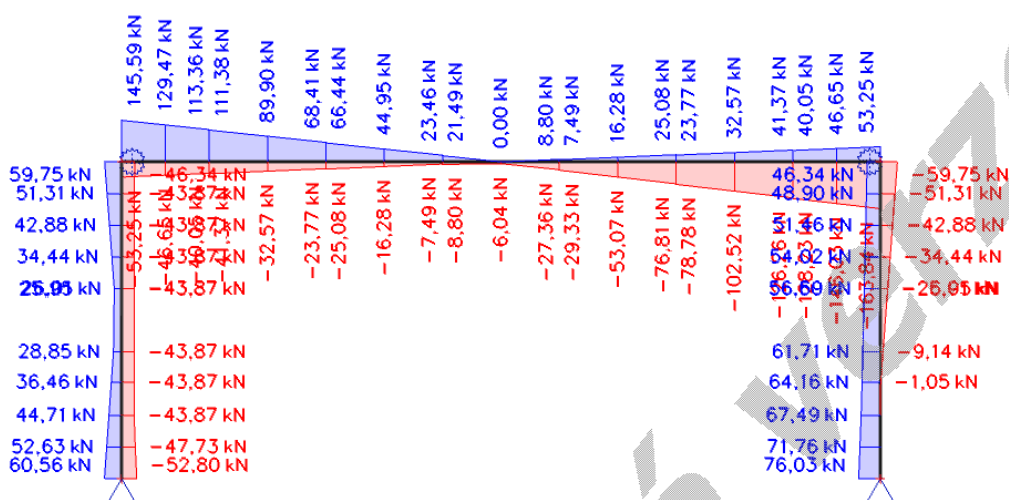
1. Mezní stav únosnosti

- NORMÁLOVÁ SÍLA N :



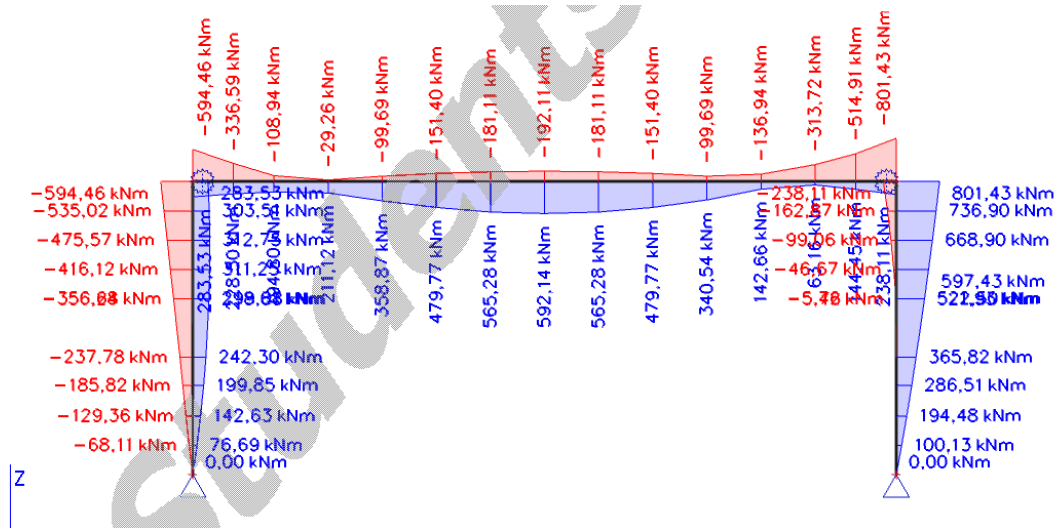
Obr. 79- Návrh rámové konstrukce - normálová síla

- POSOUVAJÍCÍ SÍLA V :



Obr. 80- Návrh rámové konstrukce - posouvající síla

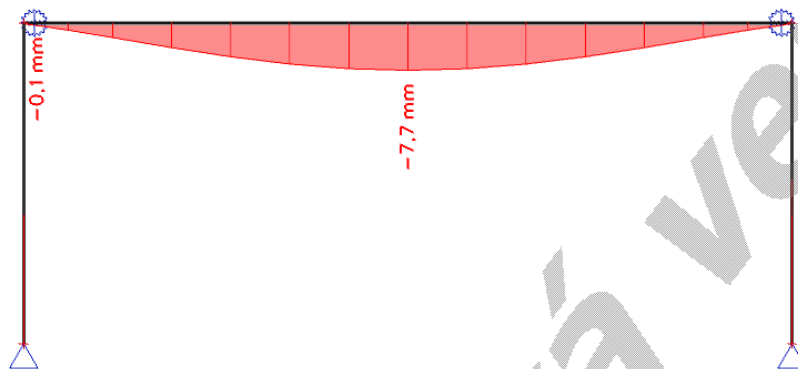
- OHYBOVÝ MOMENT M :



Obr. 81- Návrh rámové konstrukce - ohybový moment

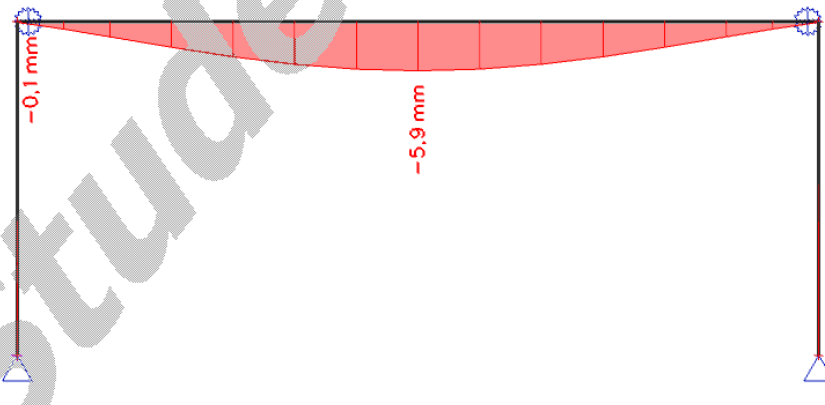
2. Mezní stav použitelnosti

- PRŮHYB OD VLASTNÍ TÍHY:



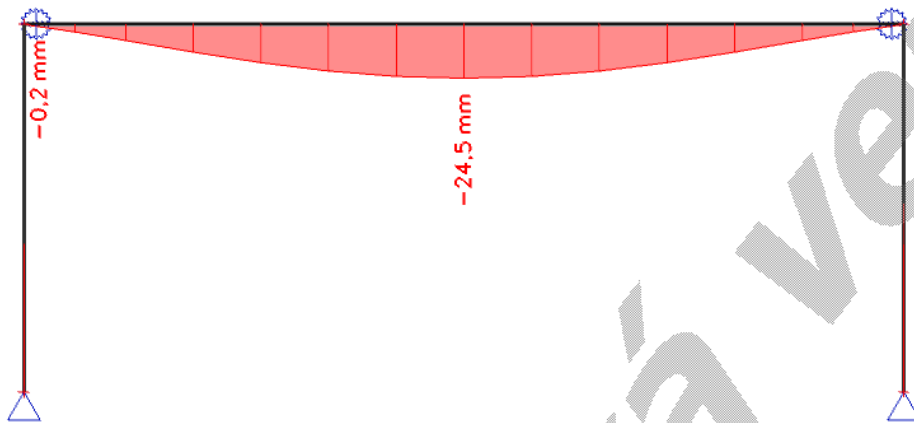
Obr. 82- Návrh rámové konstrukce - průhyb od vlastní tíhy

- PRŮHYB OD STÁLÉHO ZATÍŽENÍ:



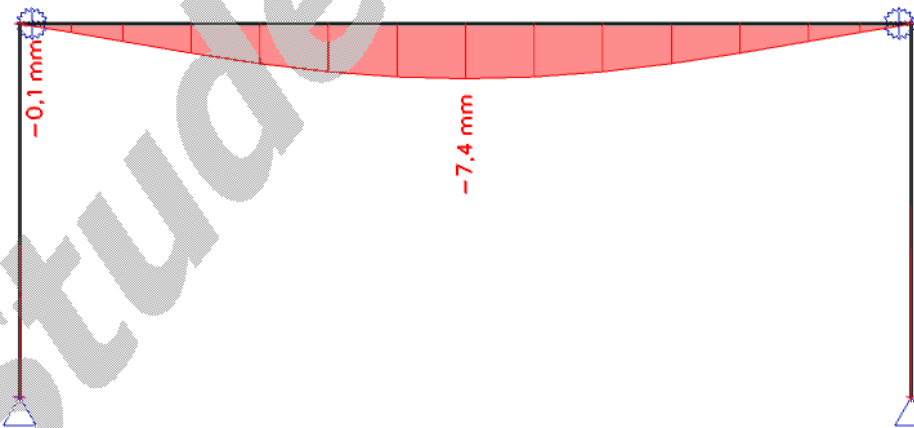
Obr. 83- Návrh rámové konstrukce - průhyb od stálého zatížení

- PRŮHYB OD ZATÍŽENÍ SNĚHEM:



Obr. 84- Návrh rámové konstrukce - průhyb od zatížení sněhem

- PRŮHYB OD ZATÍŽENÍ VĚTREM:



Obr. 85- Návrh rámové konstrukce - průhyb od zatížení větrem

5.1.2 Statické posouzení

Na základě uvedených vnitřních sil bude provedeno statické posouzení celé rámové konstrukce. Řešení bude uvedeno ve formě statického posudku.

a) Posouzení rohového spoje

1. Návrhové síly a geometrie

- Návrhové vnitřní síly:
 - $M_{ed} = 801,43 \text{ kNm}$
 - $N_{ed,p} = 59,75 \text{ kNm}$
 - $V_{ed,p} = 163,84 \text{ kNm}$
 - $N_{ed,s} = 176,77 \text{ kNm}$
 - $V_{ed,s} = 59,75 \text{ kNm}$

- Geometrie spoje: $n_1 = 34 \text{ ks}$
 $n_2 = 29 \text{ ks}$
 $r_1 = 782 \text{ mm}$
 $r_2 = 662 \text{ mm}$

2. Maxima vnitřních sil

- Zatížení jednoho kolíku od ohybového momentu (ve stojce i příčli):

$$F_M = \frac{M_{ed}}{0,85 \times (n_1 \times r_1^2 + n_2 \times r_2^2)} \times r_1$$

$$F_M = \frac{801,43}{0,85 \times (34 \times 0,782^2 + 29 \times 0,662^2)} \times 0,782$$

$$F_M = 22 \text{ kNm}$$

- Zatížení ve stojce od posouvající a normálové síly:

$$F_{N,s} = \frac{N_{ed,s}}{0,85 \times (n_1 + n_2)} = \frac{176,77}{0,85 \times (34 + 29)} = 3,3 \text{ kN}$$

$$F_{V,s} = \frac{V_{ed,s}}{0,85 \times (n_1 + n_2)} = \frac{59,75}{0,85 \times (34 + 29)} = 1,12 \text{ kN}$$

- Zatížení v příčli od posouvající a normálové síly:

$$F_{N,p} = \frac{N_{ed,p}}{0,85 \times (n_1 + n_2)} = \frac{59,75}{0,85 \times (34 + 29)} = 1,12 \text{ kN}$$

$$F_{V,p} = \frac{V_{ed,p}}{0,85 \times (n_1 + n_2)} = \frac{163,84}{0,85 \times (34 + 29)} = 3,06 \text{ kN}$$

- Celkové zatížení kolíku v ose rámové stojky:

$$F_{D,s} = \sqrt{(F_{N,s})^2 + (F_{V,s} + F_M)^2}$$

$$F_{D,s} = \sqrt{(3,3)^2 + (1,12 + 22)^2}$$

$$F_{D,s} = 23,35 \text{ kN}$$

- Celkové zatížení kolíku v ose rámové příčle:

$$F_{D,p} = \sqrt{(F_{N,p})^2 + (F_{V,p} + F_M)^2}$$

$$F_{D,p} = \sqrt{(1,12)^2 + (3,06 + 22)^2}$$

$$F_{D,p} = 25,08 \text{ kN}$$

- Smyková síla v místě spoje:

$$V_M = \frac{M_{ed}}{\pi} \times \frac{n_1 \times r_1 + n_2 \times r_2}{n_1 \times r_1^2 + n_2 \times r_2^2} = \frac{34 \times 0,782 + 29 \times 0,662}{34 \times 0,782^2 + 29 \times 0,662^2} = 348,56 \text{ kN}$$

- Smyková síla působící na stojku:

$$F_{V,D,s} = V_M - \frac{V_{ed,s}}{2} = 348,56 - 59,75/2 = 318,68 \text{ kN}$$

- Smyková síla působící na příčel:

$$F_{V,D,p} = V_M - \frac{V_{ed,s}}{2} = 348,56 - 163,84/2 = 266,64 \text{ kN}$$

Následující charakteristiky jsou vyjádřeny dle ČSN EN 1995-1-1. [16]

- Charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k = 0,082 \times (1 - 0,01 \times 24) \times 380 = 23,68 \text{ MPa}$$

- Součinitel pro jehličnaté dřeviny: [16]

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d = 1,35 + 0,015 \times 24 = 1,71$$

3. Únosnost kolíku v ose rámové stojky

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken ve stojce:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{F_{V,S} + F_M}{F_{N,S}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1,12 + 22}{3,3} \right) = 81,88^\circ$$

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken v příčli:

$$\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1 = 8,12^\circ$$

- Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům - stojka: [16]

$$f_{h,\alpha,k,1} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin \alpha^2 + \cos \alpha^2} = \frac{23,68}{1,71 \times \sin 81,88^2 + \cos 81,88^2} = 13,96 \text{ MPa}$$

- Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům - příčel: [16]

$$f_{h,\alpha,k,2} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin \alpha^2 + \cos \alpha^2} = \frac{23,68}{1,71 \times \sin 8,12^2 + \cos 8,12^2} = 23,34 \text{ MPa}$$

- Poměr mezi pevnostmi v otláčení: [16]

$$\theta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{23,34}{13,96} = 1,67$$

- Charakteristický plastický moment únosnosti: [16]

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6} = 0,3 \times 400 \times 24^{2,6} = 465297,24 \text{ Nmm}$$

$$f_{u,k} = 400 \text{ MPa (ocelové kolíky 4.6)}$$

- Charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho kolíku: $F_{v,Rk} = \min$ [16]

$$f_{h,1,k} \times t_1 \times d$$

$$0,5 \times f_{h,2,k} \times t_2 \times d$$

$$1,05 \times \frac{f_{h,1,k} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \times \left(\sqrt{2 \times \beta \times (1 + \beta)} + \frac{4 \times \beta \times (2 + \beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times d \times t_1^2} - \theta \right)$$

$$1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times \beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d}$$

$$F_{v,Rk} = \min(46,92; 44,83; 21,4; 27,4) = 21,4 \text{ MPa}$$

Vzhledem k rozsahu tohoto výpočtu byla charakteristická únosnost určena pomocí analytického modelu.

- Návrhová únosnost pro jeden stříh jednoho kolíku: [16]

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \times \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{21,4}{1,25} = 13,69 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M = 1,25 \text{ (součinitel vlastností materiálů a únosnosti pro LLD)}$$

$$k_{mod} = 0,8 \text{ (modifikační součinitel pro 1. třídu provozu, střednědobé zatížení)}$$

- Posouzení MSÚ: [16] $\frac{F_{D,s}}{2 \times F_{v,Rd}} \leq 1,0$

$$\frac{23,35}{2 \times 13,69} \leq 1,0$$

$$0,85 \leq 1,0 \quad \underline{\underline{\text{VYHOVUJE}}}$$

- Maximální smykové napětí: [16]

$$\tau_V = 1,5 \times \frac{F_{V,D,s}}{b \times h} = 1,5 \times \frac{318,68}{0,28 \times 1,9} = 0,9 \text{ MPa}$$

- Návrhová smyková únosnost: [16]

$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{2,7}{1,25} = 1,73 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa (charakteristická pevnost ve smyku GL24h)}$$

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,9}{1,73} \leq 1,0$$

$$0,52 \leq 1,0 \quad \underline{\underline{\text{VYHOVUJE}}}$$

4. Únosnost kolíku v ose rámové přičle

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken v přičli:

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{F_{V,p} + F_M}{F_{N,p}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{3,06 + 22}{1,12} \right) = 87,44^\circ$$

- Úhel mezi výslednicí sil a směrem vláken ve stojce:

$$\alpha_1 = 90^\circ - \alpha_2 = 2,56^\circ$$

- Charakteristická pevnost v otlacení pod úhlem k vláknům - stojka: [16]

$$f_{h,\alpha,k,1} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{23,68}{1,71 \times \sin^2 2,56^\circ + \cos^2 2,56^\circ} = 23,64 \text{ MPa}$$

- Charakteristická pevnost v otláčení pod úhlem k vláknům - příčel: [16]

$$f_{h,\alpha,k,2} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{23,68}{1,71 \times \sin^2 87,44^\circ + \cos^2 87,44^\circ} = \mathbf{13,85 \text{ MPa}}$$

- Poměr mezi pevnostmi v otláčení: [16]

$$\theta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{13,85}{23,64} = \mathbf{0,59}$$

- Charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho kolíku: $F_{v,Rk} = \min$ [16]

$$f_{h,1,k} \times t_1 \times d$$

$$0,5 \times f_{h,2,k} \times t_2 \times d$$

$$1,05 \times \frac{f_{h,1,k} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \times \left(\sqrt{2 \times \beta \times (1 + \beta)} + \frac{4 \times \beta \times (2 + \beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times d \times t_1^2} - \theta \right)$$

$$1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times \beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d}$$

$$F_{v,Rk} = \min (79,5; 26,6; 27,99; 22,72) = \mathbf{22,72 \text{ MPa}}$$

Vzhledem k rozsahu tohoto výpočtu byla charakteristická únosnost určena pomocí analytického modelu.

- Návrhová únosnost pro jeden stříh jednoho kolíku: [16]

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \times \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{22,72}{1,25} = \mathbf{14,54 \text{ MPa}}$$

$$\gamma_M = \mathbf{1,25} \text{ (součinitel vlastností materiálů a únosnosti pro LLD)}$$

$$k_{mod} = \mathbf{0,8} \text{ (modifikační součinitel pro 1. třídu provozu, střednědobé zatížení)}$$

- Posouzení MSÚ: [16] $\frac{F_{D,p}}{2 \times F_{v,Rd}} \leq 1,0$

$$\frac{25,08}{2 \times 14,54} \leq 1,0$$

$$\mathbf{0,86 \leq 1,0}$$

VYHOVUJE

- Maximální smykové napětí: [16]

$$\tau_V = 1,5 \times \frac{F_{V,D,p}}{b \times h} = 1,5 \times \frac{266,64}{0,16 \times 1,9} = \mathbf{1,31 \text{ MPa}}$$

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{1,31}{1,73} \leq 1,0$$

$$\mathbf{0,75 \leq 1,0}$$

VYHOVUJE

NÁVRH: 63 x OCELOVÝ KOLÍK, PEVNOSTNÍ TŘÍDA 4.6

b) Posouzení rámové příčle

1. Návrhové síly a rozměry

- Návrhové vnitřní síly: $M_{ed} = 801,43 \text{ kNm}$
 $N_{ed,p} = 46,34 \text{ kNm}$
 $V_{ed,p} = 163,84 \text{ kNm}$
- Rozměry příčle: $h = 1900 \text{ mm}$
 $b = 160 \text{ mm}$
- Průřezové charakteristiky: $A = b \times h = 0,16 \times 1,9 = 0,304 \text{ m}^2$
 $W = \frac{1}{6} \times b \times h^2 = 0,16 \times 1,9 = 0,09627 \text{ m}^3$

2. Posouzení na ohyb u podpory

- Napětí v ohybu: $\sigma_{m,d} = \frac{M_{ed}}{W} = \frac{801,43 \times 10^{-3}}{0,09627} = 8,32 \text{ MPa}$
- Návrhová pevnost v ohybu: [16] $f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$
 $f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$ (charakteristická pevnost v ohybu GL24h)
- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{8,32}{15,36} \leq 1,0$$

$$0,54 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

3. Posouzení příčné a torzní stability

- Kritické napětí v ohybu: [16] $\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2 \times E_{0,05}}{h \times L_{ef}} = \frac{0,78 \times 0,16^2 \times 9400}{1,9 \times 6,25} = 15,8 \text{ MPa}$
 $E_{0,05} = 9400 \text{ MPa}$ (5 % kvantil modulu pružnosti ve směru vláken GL24h)
 $L_{ef} = 6,25 \text{ m}$ (hodnota určena pomocí softwaru Scia engineer 17.1)

Hodnota L_{ef} vyjadřuje nejvíce kritickou vzdálenost, kde není zabráněno klopení. V tomto případě se jedná o vzdálenost mezi podporou a místem přechodu ze záporného na kladný ohybový moment. Kritická délka byla dále navýšena o 10 %.

- Poměrná štíhlost v ohybu: [16] $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{15,8}} = 1,2324$

- Součinitel pro zohlednění příčné a torzní stability: [16]

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} = 1,56 - 0,75 \times 1,2324 = 0,6357$$

(platí pro $0,75 < \lambda_{rel,m} < 1,4$)

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{8,32}{0,6357 \times 15,36} \leq 1,0$$

$$0,85 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

4. Posouzení příčné a torzní stability v kombinaci s tlakem

- Napětí v tlaku: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{46,34 \times 10^{-3}}{0,304} = 0,15 \text{ MPa}$

- Návrhová pevnost v tlaku: [16] $f_{c,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$

$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa}$ (charakteristická pevnost v tlaku GL24h)

- Štíhlost ve směru klopení: $\lambda_z = \frac{L_{cr}}{i_z} = \frac{5}{0,046} = 108,696$

$L_{cr} = 5 \text{ m}$ (kritická délka mezi zajištěním proti vybočení, vzdálenost mezi vaznicemi)

$i_z = 0,046 \text{ m}$ (poloměr setrvačnosti ve směru vybočení, zjištěno ve Scia engineer 17.1)

- Poměrná štíhlost v tlaku: [16] $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{108,696}{\pi} \times \sqrt{\frac{24}{9400}} = 1,75$

- Součinitel vzpěrnosti: [16] $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1,75^2}} = 0,306$

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (1,75 - 0,3) + 1,75^2) = 2,1$$

(dílní součinitel vzpěrnosti se zohledněním materiálu, $\beta_c = 0,1$ pro LLD)

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$(0,85)^2 + \frac{0,15}{0,306 \times 15,36} \leq 1,0$$

$$0,75 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

5. Posouzení na smyk u podpory

- Maximální smykové napětí: [16]

$$\tau_V = 1,5 \times \frac{V_{ed}}{b_{eff} \times h} = 1,5 \times \frac{163,84 \times 10^{-3}}{0,1072 \times 1,9} = 1,21 \text{ MPa}$$

$b_{eff} = 0,67 \times b = 0,67 \times 0,16 = 0,1072 \text{ m}$ (efektivní šířka průřezu, zohledňující sesychání)

- Návrhová smyková únosnost: [16]

$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{2,7}{1,25} = 1,73 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa} \text{ (charakteristická pevnost ve smyku GL24h)}$$

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{1,21}{1,73} \leq 1,0$$

$$0,7 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

6. Posouzení průhybu

- Hodnoty okamžitého průhybu: $w_{inst,g} = 13,6 \text{ mm}$ (od stálého zatížení)
 $w_{inst,s} = 24,5 \text{ mm}$ (od zatížení sněhem)
 $w_{inst,w} = 7,4 \text{ mm}$ (od zatížení větrem)

- Celkový okamžitý průhyb: [16]

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,s} + w_{inst,w} = 13,6 + 24,5 + 7,4 = 45,5 \text{ mm}$$

- Mezní okamžitý průhyb: [16] $w_{inst,lim} = \frac{L}{300} = \frac{32500}{300} = 108,3 \text{ mm}$

- Posouzení MSP pro okamžitý průhyb: [16]

$$w_{inst} \leq w_{inst,lim}$$

$$45,5 \text{ mm} \leq 108,3 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- Celkový konečný průhyb: [16] [32]

$$w_{net,fin} = w_{inst,g} \times (1 + k_{def}) + w_{inst,s} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) + w_{inst,w} \times (1 + k_{def})$$

$$w_{net,fin} = 13,6 \times (1 + 0,6) + 24,5 \times (1 + 0,2 \times 0,6) + 7,4 \times (1 + 0,6)$$

$$w_{net,fin} = 61 \text{ mm}$$

$$k_{def} = 0,6 \text{ (součinitel dotvarování pro LLD)}$$

$$\psi_2 = 0,2 \text{ (pro zatížení sněhem)}$$

- Mezní konečný průhyb: [16] $w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{32500}{250} = 130 \text{ mm}$

- Posouzení MSP pro konečný průhyb: [16]

$$w_{net,fin} \leq w_{net,fin,lim}$$

$$61 \text{ mm} \leq 130 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

NÁVRH: PŘÍČEL RÁMU 160 x 1900 mm, GL24h

c) Posouzení rámové stojky

Kvůli podélnému seříznutí tohoto konstrukčního prvku bude nutné zohlednit napětí působící šikmo k vláknům a sloup počítat jako sedlový nosník. Tento vliv bude zahrnut jako redukce pevnosti v ohybu.

1. Návrhové síly a rozměry

- Návrhové vnitřní síly:
 $M_{ed} = 801,43 \text{ kNm}$
 $N_{ed,s,1} = 176,77 \text{ kNm}$
 $N_{ed,s,2} = 235,1 \text{ kNm}$
 $V_{ed,s,1} = 59,75 \text{ kNm}$
 $V_{ed,s,2} = 76,03 \text{ kNm}$
- Rozměry příčle:
 $h_1 = 1900 \text{ mm}$
 $h_2 = 1400 \text{ mm}$
 $b = 2 \times 140 \text{ mm}$
- Průřezové charakteristiky:
 $A_1 = b \times h = 0,28 \times 1,9 = 0,532 \text{ m}^2$
 $A_2 = b \times h = 0,28 \times 1,4 = 0,392 \text{ m}^2$
 $W = \frac{1}{6} \times b \times h^2 = 0,28 \times 1,9 = 0,1685 \text{ m}^3$

2. Posouzení v hlavě stojky

- Napětí v ohybu: [16] $\sigma_{m,d} = \frac{M_{ed}}{W} = \frac{801,43 \times 10^{-3}}{0,1685} = 4,75 \text{ MPa}$
- Návrhová pevnost v ohybu: [16] $f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$
 $f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$ (charakteristická pevnost v ohybu GL24h)
- Součinitel pro zohlednění seříznutí: [16]

$$k_{m,\alpha} = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \times f_{v,d}} \times \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \times (\tan \alpha)^2 \right)^2}$$
$$k_{m,\alpha} = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{15,36}{1,5 \times 1,73} \times \tan 2^\circ \right)^2 + \left(\frac{15,36}{0,256} \times (\tan 2^\circ)^2 \right)^2}$$
$$k_{m,\alpha} = 0,98$$

$\alpha = 2^\circ$ (změřeno z původní výkresové dokumentace)

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{0,4}{1,25} = 0,256 \text{ MPa}$$

$f_{c,90,k}$ (charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům GL24h)

- Napětí v tlaku: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed,s,1}}{A_1} = \frac{176,77 \times 10^{-3}}{0,532} = 0,33 \text{ MPa}$

- Návrhová pevnost v tlaku: [16] $f_{c,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$

$$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa (charakteristická pevnost v tlaku GL24h)}$$

- Poměrná štíhlost v tlaku: [16] $\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{A_1 \times f_{c,0,k}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,532 \times 24}{5,729}} = 1,49$

$$N_{cr} = k_{st} \times N_{ed,s,1} = 32,41 \times 176,77 = 5729,12 \text{ kN}$$

Z důvodu neurčité vzpěrné délky rámového sloupu byla hodnota poměrné štíhlosti vyjádřena přes vyhodnocení kritické síly N_{cr} . Ta byla vyjádřena pomocí součinitele ztráty stability konstrukce k_{st} , který byl určen pomocí softwaru Scia engineer 17.1. Byl zadán stabilitní výpočet pro všechny uvažované kombinace a na základě toho byl vyhodnocen součinitel kritického zatížení.

- Součinitel vzpěrnosti: [16] $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,67 + \sqrt{1,67^2 - 1,49^2}} = 0,412$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (1,49 - 0,3) + 1,49^2) = 1,67$$

(dílní součinitel vzpěrnosti se zohledněním materiálu, $\beta_c = 0,1$ pro LLD)

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{m,\alpha} \times f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{4,75}{0,98 \times 15,36} + \frac{0,33}{0,412 \times 15,36} \leq 1,0$$

$$0,37 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

- Maximální smykové napětí: [16]

$$\tau_V = 1,5 \times \frac{V_{ed,s,1}}{b_{eff} \times h} = 1,5 \times \frac{59,75 \times 10^{-3}}{0,1876 \times 1,9} = 0,25 \text{ MPa}$$

$b_{eff} = 0,67 \times b = 0,67 \times 0,28 = 0,1876 \text{ m}$ (efektivní šířka průřezu, zohledňující sesychání)

- Návrhová smyková únosnost: [16]

$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times \frac{2,7}{1,25} = 1,73 \text{ MPa}$$

$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$ (charakteristická pevnost ve smyku GL24h)

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,25}{1,73} \leq 1,0$$

$$0,14 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

3. Posouzení v patě stojky

- Napětí v tlaku: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed,s,2}}{A_2} = \frac{235,1 \times 10^{-3}}{0,392} = 0,6 \text{ MPa}$

- Poměrná štíhlost v tlaku: [16] $\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{A_2 \times f_{c,0,k}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,392 \times 24}{5,729}} = 1,28$

$$N_{cr} = k_{st} \times N_{ed,s,1} = 32,41 \times 176,77 = 5729,12 \text{ kN}$$

- Součinitel vzpěrnosti: [16] $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,36 + \sqrt{1,36^2 - 1,28^2}} = 0,549$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (1,28 - 0,3) + 1,28^2) = 1,36$$

(dílčí součinitel vzpěrnosti se zohledněním materiálu, $\beta_c = 0,1$ pro LLD)

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,6}{0,549 \times 15,36} \leq 1,0$$

$$0,07 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

- Maximální smykové napětí: [16]

$$\tau_v = 1,5 \times \frac{V_{ed,s,2}}{b_{eff} \times h} = 1,5 \times \frac{76,03 \times 10^{-3}}{0,1876 \times 1,4} = 0,43 \text{ MPa}$$

$$b_{eff} = 0,67 \times b = 0,67 \times 0,28 = 0,1876 \text{ m (efektivní šířka průřezu, zohledňující sesychání)}$$

- Posouzení MSÚ: [16]

$$\frac{\tau_v}{f_{v,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,43}{1,73} \leq 1,0$$

$$0,25 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

NÁVRH: STOJKA RÁMU, PROMĚNNÝ PRŮŘEZ 2 x 140 x 1900 - 1400 mm, GL24h

Navržená rámová konstrukce vyhoví s využitím únosnosti 86 % u rohového spoje, 85 % u rámové příčle a 37 % u rámové stojky. Bylo tedy dosaženo ideálního bezpečného návrhu a proces optimalizace proběhl dle očekávání. V případě stojky není možné vyšší využití kvůli omezujícím faktorům, což jsou rozměry rámového rohu a dále připojení stojky v patě.

Kvůli výraznému snížení průřezových rozměrů je patrný velký nárůst deformací,

který však odpovídá limitní normovým hodnotám a není tedy narušena použitelnost konstrukce. Bližší specifikace navrženého konstrukčního řešení je uvedena ve výkresové dokumentaci, která je součástí přílohy.

5.2 Vyhodnocení optimalizace

Pomocí předchozího podrobného rozboru únosnosti a tuhosti spojů v rámovém rohu bylo navrženo alternativní konstrukční provedení rámové konstrukce stávající haly v Sušici. Byl využit především analytický model, který umožňoval optimalizovat návrh na požadovaný stupeň využití únosnosti a dále parametrický model, v němž byla specifikována hodnota tuhosti. Použitím metody konečných prvků byla tuhost v porovnání s normou velmi navýšena a došlo tak k maximálnímu využití konstrukce.

V následujícím přehledu bude porovnáno stávající a navržené konstrukční řešení pro jednotlivé části rámu.

1. Spoj v rámovém rohu

ŘEŠENÍ	Spojovací prvek	Materiál	Počet kusů	Průměr prvku	Délka prvku
STÁVAJÍCÍ	<i>Ocelový kolík</i>	<i>Ocel 4.6</i>	<i>4 x 64</i>	24 mm	<i>480 mm</i>
NÁVRH	<i>Ocelový kolík</i>	<i>Ocel 4.6</i>	2 x 63	24 mm	440 mm

Tab. 17 - Vyhodnocení konstrukčního řešení - spoj v rámovém rohu

Ve stávajícím řešení je použit zdvojený rám, který se střídá s kloubově uloženými vazníky. Aby bylo možné provést přesné porovnání a vyčíslení úspor, bylo by nutné navrhnout celou halovou konstrukci. Předmětem této práce je však návrh a optimalizace rámových rohů a přehled slouží jen pro určité porovnání.

2. Rámová příčel

ŘEŠENÍ	Typ průřezu	Materiál	Počet kusů	Šířka průřezu	Výška průřezu
STÁVAJÍCÍ	<i>Konstantní</i>	<i>GL32c</i>	2	200 mm	<i>2100 mm</i>
NÁVRH	<i>Konstantní</i>	GL24h	1	160 mm	1900 mm

Tab. 18 - Vyhodnocení konstrukčního řešení - rámová příčel

Ze všech navržených konstrukčních úprav byl proveden největší rozsah optimalizace právě u rámové příčle. Došlo ke zúžení šířky průřezu, byla snížena i jeho výška a v daném místě postačuje pouze jeden prvek místo původní dvojice. Na úkor těchto úprav je však nutné počítat s výrazným přírůstkem průhybu a deformace obecně. Posouzení však potvrdilo, že nedojde k překročení mezních hodnot.

3. Rámová stojka

ŘEŠENÍ	Typ průřezu	Materiál	Počet kusů	Šířka průřezu	Výška průřezu
STÁVAJÍCÍ	<i>Proměnný</i>	<i>GL32c</i>	<i>2 x 2</i>	480 mm	1900 -1400 mm
NÁVRH	<i>Proměnný, zdvojený</i>	<i>GL24h</i>	2	2 x 140 mm	1900 -1400 mm

Tab. 19 - Vyhodnocení konstrukčního řešení - rámová stojka

Statické posouzení potvrdilo předpoklad, že stojka může být rozdělena na 2 samostatné průřezy, mezi které bude vložena příčel v místě spoje. Po výšce tedy není nutné zachovat plný průřez jako tomu je u stávajícího řešení. Mimo jiné není třeba použít dvojici rámu a postačuje dřevo v pevnostní třídě GL24h.

Proces optimalizace proběhl podle předpokladu a bylo by dosaženo výrazných úspor. K přesnému vyčíslení je však třeba provést statické posouzení halové konstrukce jako celku. Tato práce se zabývá především problematikou spoje v rámovém rohu a návrh byl proveden pouze pro dílčí nosnou rámovou konstrukci.

Navržené optimální konstrukční řešení je dále specifikováno formou výkresové dokumentace v příloze.

6. Závěr

Proces optimalizace je jedním z nezbytných postupů novodobého navrhování a jedině díky maximálnímu využití získaných poznatků je možné tento obor posunout kupředu. Použitím vhodného softwaru se dá takto dosáhnout většího využití konstrukcí a tím i výrazných úspor.

V této práci byl proveden souhrn možných řešení rámových konstrukcí a hlavní důraz byl kladen na spoj v rámovém rohu. Kromě obecného přehledu rámových soustav byl proveden také teoretický rozbor statického působení ve vybraných rohových spojkách a byly zvoleny dva hlavní typy, u nichž došlo k následné statické analýze. K porovnání byl vybrán kruhový šroubovaný styčník a dále styčník s vloženou ocelovou deskou, kde se jedná o oboustranný spoj mezi stojkou a příclí. Pro obě zvolené varianty byly použity ocelové kolíky 4.6 o průměru 24 mm.

Na základě těchto poznatků došlo k vytvoření dvou samostatných analytických modelů, kde se automaticky přepočítává výsledná únosnost a její využití vůči změně vybraných parametrů. Jako referenční konstrukce pro tento rozbor byla vybrána stávající sportovní hala v Sušici.

Díky těmto modelům byly podrobně zkoumány vlivy vybraných parametrů, mezi které například patří průměr spojovacího prvku, jeho vzdálenost od středu otáčení nebo tloušťka vnějšího dřevěného průřezu. Jako nejdůležitější a nejvíce efektivní parametr byl vyhodnocen poloměr mezi ocelovým kolíkem a středem otáčení, který souvisí s geometrií spoje. Tímto způsobem je tedy možné spoj nejlépe optimalizovat a je případně výhodné i zvětšit průřez dřevěného konstrukčního prvku. Mezi další parametry vhodné k optimalizaci patří také pevnostní třída dřeva nebo tloušťka vnějšího konstrukčního prvku. Jejich vliv však není tak patrný jako u změny geometrického uspořádání. Kromě určení důležitých parametrů byla také vyhodnocena únosnost a potřebný počet spojovacích prvků. V tomto ohledu se jako jednoznačně výhodnější projevila kruhový šroubovaný styčník, který využívá k zaručení stejné únosnosti poloviční počet ocelových kolíků.

Únosnost spoje však také úzce souvisí s jeho tuhostí, což je v případě rámových konstrukcí typická problematika. Z tohoto důvodu byl dále u dvou vybraných variant vytvořen parametrický model rámového rohu, jehož geometrie byla nastavena tak, aby

bylo získáno maximální využití únosnosti. Parametrické modely byly počítány metodou konečných prvků v softwaru Dlubal RFEM a na základě vyhodnocených deformací byly určeny hodnoty tuhosti. V tomto ohledu se opět jako výhodnější projevil kruhový šroubovaný styčník. Díky tomuto procesu byly získány téměř dvojnásobné hodnoty tuhosti v porovnání s postupem předepsaným normou ČSN EN 1993-1-1.

Všechny získané poznatky byly dále využity k návrhu rámové konstrukce u stávajícího objektu sportovní haly v Sušici a jako typ rámového spoje byl použit kruhový styčník, který vyšel z provedeného rozboru celkově jako výhodnější. Procesem optimalizace byl navržen nový rám s využitím únosnosti 86 % v případě spoje, 85 % v případě rámové příčle a 37 % u rámové stojky. Stojka jako koncový prvek není v rámci optimalizace příliš modifikovatelná a podléhá mnoha limitujícím faktorům kvůli ostatním prvkům rámu. Na závěr došlo k porovnání se stávajícím provedením rámové konstrukce, kde byly znázorněny veškeré konstrukční změny a úspora nového návrhu.

Zpracováním této diplomové práce byl především proveden podrobný proces optimalizace rámových spojů a byl vytvořen návod na navržení efektivních a úsporných rámových konstrukcí. Z řešení této problematiky vyplývá, že spoje jsou nejdůležitější částí dřevěných konstrukcí a jejich podrobný rozbor má dopad na celý statický systém. Této problematice je nutné věnovat pozornost a do budoucna ji více zdokonalovat.

7. Seznam příloh

- **Příloha č. 1: Konstrukční výkres rámu**
- **Příloha č. 2: Detail rámového rohu**

8. Seznam použitých zdrojů

8.1 Literatura

- [1] **Petr Kuklík. Dřevěné konstrukce 10.**
Praha: České vysoké učení technické v Praze - Vydavatelství ČVUT , 2004,
ISBN 80-01-02871-2.
- [2] **Jack Porteous, Abdy Kermani. Structural timber design to Eurocode 5.**
2nd edition. Chichester: Blackwell Publishing Ltd., 2013, ISBN 978-0-470-67500-7.
- [3] **Petr Kuklík. Navrhování dřevěných konstrukcí.**
20. publikace ČKAIT. Třebíč: Akcent spol. s.r.o., 1997, ISBN 80-86047-19-9.
- [4] **Bohumil Koželouh. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 STEP 1 - Navrhování a konstrukční materiály.** Zlín: Bohumil Koželouh - Zlínské tiskárny, 1998,
ISBN 80-238-2620-4.
- [5] **H. J. Blass, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, G. Steck.**
Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí .
Praha: Informační centrum ČKAIT, 2008, ISBN 978-80-87093-73-3.
- [6] **Hans Larsen and Vahik Enjily. Practical design of timber structures to Eurocode 5.**
Londýn: Thomas Telford Limited, 2009, ISBN 978-0-7277-3609-3.
- [7] **Bohumil Koželouh. Dřevěné konstrukce - Příklady a řešení podle ČSN 73 1702.**
291. publikace ČKAIT. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009,
ISBN 978-80-87438-16-9.
- [8] **Petr Kuklík. Dřevěné konstrukce.**
Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005, ISBN 80-86769-72-0.
- [9] **Richard Suggett. Houses and history in the march of Wales - Radnoshire 1400 - 1800.**
Wales: Comisiwn Brenhinol Henebion Cymru, 2005, ISBN 1-871184-23-1.
- [10] **Vladimír Jirka, Fakulta architektury, ČVUT v Praze.**
Konstrukční systémy pozemních staveb, Stavební soustavy halových objektů.
Praha: Ústav stavitelství I, Fakulta architektury, ČVUT v Praze, 2011.

- [11] **Petr Kuklík, Anna Kuklíková, Karel Mikeš. Dřevěné konstrukce 1 - cvičení.**
11565. publikace. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2013,
ISBN 978-80-01-05227-3.
- [12] **Steinbrecher. Ausstellungshalle Hergat - Rahmenecken mit Universal - Keilzinkung.**
Cottbus - Senftenberg: Brandenburgische Technische Universität,
Fachgebiet Holzbau, 2013.
- [13] **Bohumil Koželouh. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 STEP 2 -
Navrhování detailů a nosných systémů.** Praha: Informační centrum ČKAIT, 2004,
ISBN 80-86-769-13-5.
- [14] **Peter Lippert. Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen.**
Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2013.
- [15] **Tomáš Dvořák. Dřevěné konstrukce.**
Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992, ISBN 80-01-00095-8.
- [16] **ČSN EN 1995-1-1, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí-část 1-1:
Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.**
ICS 91.010.30. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2006.
- [17] **DIN 1052, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken -
Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.**
ICS 91.080.20. Berlin: Deutsches Institut für Normung, srpen 2004.
- [18] **Bohumil Straka, Ladislav Bukovský. Navrhování dřevěných konstrukcí.**
Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1996, ISBN 80-7204-015-4.
- [19] **Josef Macháček. Ocelové konstrukce - Globální analýza OK, Kroucení prutů.**
Praha: ČVUT - Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2015.
- [20] **Petr Konvalinka. Analýza konstrukcí - Deformační metoda.**
Praha: ČVUT - Fakulta stavební, Katedra mechaniky, 2015.
- [21] **Bořek Patzák. Numerická analýza konstrukcí - Úvod do metod řešení řídkých soustav
lineárních rovnic.** Praha: ČVUT - Fakulta stavební, Katedra mechaniky, 2017.

- [22] **Petr Kuklík. Dřevěné konstrukce II.**
Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996, ISBN 80-01-00774-X.
- [23] **Henning Ernst. Montagefreundliche Verbindung für biegesteife Rahmenecken mit Würth - Volgewindeschrauben.**
Rülzheim: 16. Internationales Holzbau - Forum, 2010.
- [24] **Petr Červený, Lubomír Jelínek. Tesařské konstrukce.**
3. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2013, ISBN 978-80-87438-34-3.
- [25] **Karel Mikeš. Dřevěné konstrukce 2 - Spoje dle EN 1995-1-1.**
Praha: ČVUT - Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2018.
- [26] **Thomas Bogensperger. Nachweisführung der Eckausbildung von Rahmenkonstruktionen.** Aachen: TU Aachen, Fachgebiet Holzbau, 2011.
- [27] **Karl - Heinz Hollinsky, Werner Hochhauser. Holzbau - Dreigelenksysteme.**
Wien: TU Wien, Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau , 2016.
- [28] **ČSN EN 1993-1-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí-část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.** ICS 91.080.10.
Praha: Český normalizační institut, prosinec 2006.
- [29] **ČSN EN 1991-1-1, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí-část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb.** ICS 91.010.30.
Praha: Český normalizační institut, březen 2004.
- [30] **ČSN EN 1991-1-3, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí-část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem.** ICS 91.010.30. Praha: Český normalizační institut, červen 2005.
- [31] **ČSN EN 1991-1-4, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí-část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.** ICS 91.010.30. Praha: Český normalizační institut, duben 2007.
- [32] **ČSN EN 1990, Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.** ICS 91.010.30.
Praha: Český normalizační institut, březen 2004.

6.2 Internetové zdroje

- [I] **Bohumil Straka, Milan Šmak, VUT Brno, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí. Dřevěné konstrukční systémy a jejich možnosti použití.** In: stavba.tzb-info.cz [online]. Topinfo s.r.o., 2015 [cit. 7.10.2018].
Dostupné z: stavba.tzb-info.cz/technologie-staveni-drevostaveb/13615-drevene-konstrukcni-systemy-a-jejich-moznosti-pouziti
- [II] **Jan Reisner, Martin Böhm, Fakulta lesnická a dřevařská, ČZU v Praze, Katedra zpracování dřeva. Lepené lamelové dřevo.** In: www.lesprace.cz [online], Lesnická práce s.r.o. , 2018 [cit. 7.10.2018]. Dostupné z: www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-89-2010/lesnicka-prace-c-11-10/lepene-lamelove-drevo
- [III] **Bohumil Straka, Milan Šmak. Halové stavby s dřevěnými obloukovými, vazníkovými a rámovými nosnými dílci.** In: www.casopisstavebnictvi.cz [online], Informační centrum ČKAIT s.r.o. , 2007 [cit. 7.10.2018].
Dostupné z: www.casopisstavebnictvi.cz/halove-stavby-s-drevenymi-obloukovymi-vaznikovymi-a-ramovymi-nosnymi-dilci_N442
- [IV] **Bohumil Koželouh., Konstrukční materiál vrstvené dřevo.**
In: imaterialy.dumabyt.cz [online], Business Media s.r.o., 2016 [cit. 10.10.2018].
Dostupné z: imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-material-vrstvene-drevo_43529.html
- [V] **Bohumil Straka, Milan Šmak. Kolíkové spoje v dřevěných konstrukcích.**
In: stavba.tzb-info.cz [online], Topinfo s.r.o., 2017 [cit. 2.12.2018].
- [VI] **Taros Nova - reference** [online]. Taros Nova s.r.o., 2018, [cit.2.12.2018].
Dostupné z: <http://m.taros-nova.cz>
- [VII] **Dřevo pro život - dřevěná stavba roku** [online]. Nadace dřevo pro život, 2018, [cit.3.12.2018]. Dostupné z: www.drevoprozivot.cz/drevena-stavba-roku/drevene-konstrukce-realizace-2016/mansardova_stresni_konstrukce_skladu_mirejovice
- [VIII] **Fachmarkt OHG - Konstruktionsholz** [online]. UX Themes, 2018, [cit.8.12.2018].
Dostupné z: gk-fachmarkt.de/konstruktionsholz/leimholz-bsh-fichte/

- [IX] **Ante - holz - produkte** [online]. Ante - holz GmbH., 2018, [cit.8.12.2018].
Dostupné z: www.ante-holz.de/produkte/bsh-brettschichtholz/bsh.html
- [X] **Halové systémy - sendvičové izolační panely** [online]. Halové systémy s.r.o., 2013,
[cit.20.12.2018]. Dostupné z: www.halovesystemy.cz/sendvicove-izolacni-pur-panely-pur-panel-strecha