

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ondřej Mikeš

Moderní dřevěné rámové konstrukce ve stavebnictví
Advanced timber rigid-frame structures in civil engineering

Studijní program: **Stavební inženýrství**

Specializace: **Pozemní stavby**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Jakub Dolejš, IWE**

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mikeš** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **502001**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Specializace: **Pozemní stavby**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Moderní dřevěné rámové konstrukce ve stavebnictví

Název bakalářské práce anglicky:

Advanced timber rigid-frame structures in civil engineering

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte shrnutí problematiky konstrukcí se dřevěnými rámovými rohy. Zaměřte se na moderní typy těchto konstrukcí. Vypracujte orientační návrh vybrané konstrukce s rámovými rohy.

Seznam doporučené literatury:

Normy řady ČSN EN, publikace TEMENTIS.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jakub Dolejš, IWE. katedra ocelových a dřevěných konstrukcí FSv

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Dr. Ing. Jakub Dolejš, IWE.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Moderní dřevěné rámové konstrukce ve stavebnictví“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů, a to v souladu s metodickým pokynem „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“. Práci jsem vypracoval pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce pana doc. Dr. Ing. Jakub Dolejše, IWE.

V Praze dne 20. 5. 2024

Ondřej Mikeš

Poděkování

Poděkování patří panu doc. Dr. Ing. Jakubu Dolejšovi, IWE za odborné vedení bakalářské práce, poskytnuté podklady, vnesený nadhled při řešení problémů, ochotu a velmi lidský přístup. Velké díky patří přítelkyni, rodičům a celé rodině za veškeré formy podpory, bez kterých by mé studium nebylo tak přínosné, plodné a dost možná ani možné. Dále také paní Ing. Anně Kuklíkové, Ph.D. za poskytnuté materiály a společnosti SCIA CZ, s.r.o. za poskytnutý výpočetní software. V neposlední řadě patří velký dík Bohu za zdraví a veškeré přijaté dary.

Abstrakt

Obsahem bakalářské práce je nejprve úvod do problematiky spojování dřevěných konstrukcí. Následně je na tomto teoretickém základě vypracováno shrnutí problematiky tuhých rámových spojů v jednotlivých variantách provedení s následným výpočtem mezního stavu únosnosti vybraného příkladu spoje. Následně byl vytvořen model tohoto rámového rohu v programu SCIA Engineer s vnesením ortotropních vlastností. Práce se také ve výpočtu zabývá vlivem zamezení objemových změn dřevěného prvku vlivem bobtnání a smršťování.

Klíčová slova

Dřevěná rámová konstrukce, rámový spoj, ocelový styčnickový plech, tah kolmo k vláknům, zamezení smršťování, dřevěné halové konstrukce, ortotropní materiál, svorníkový spoj, modelování rámového rohu.

Abstract

The content of the bachelor thesis is at first an introduction to the problem of connecting timber structures. On this theoretical foundation is subsequently developed a summary of the issues of rigid-frame connections in several design variants. Then is calculated limit state of bearing capacity for selected type of connection. After that was created a model of this frame corner in the program SCIA Engineer with specification of timber orthotropic properties. The calculation also deals with the effect of avoiding volumetric changes of the wooden element due to swelling and shrinkage

Key words

Timber frame construction, frame connection, contact steel sheet, perpendicular tension to the fibers, limited shrinking, timber hall constructions, orthotropic material, screw bolt connection, modelling rigid-frame corner

Obsah:

1. Materiálové řešení dřevěných konstrukcí	8
1.1. Rostlé dřevo	8
1.2. Lepené lamelové dřevo	9
1.2.1. Zakřivené nosníky	10
1.2.2. CLT	10
1.3. Materiály na bázi dřeva	10
1.3.1. Vrstvené dřevo	10
1.3.2. Parallam	11
1.3.3. OSB desky	11
1.3.4. Překližka	11
2. Spoje dřevěných konstrukcí	12
2.1. Spoje podle tuhosti	13
2.1.1. Kloubové spoje	14
2.1.2. Tuhé/momentové spoje	14
2.2. Spoje podle způsobu provedení	14
2.2.1. Klasické tesařské konstrukce	14
2.2.2. Kolíkové spoje	15
2.2.3. Spoje prováděné pomocí prvků kování	17
2.2.4. Skupiny spojovacích prostředků	19
2.2.5. Požární odolnost spojů	19
2.2.6. Změny vlastností v průběhu životnosti	20
3. Dřevěné rámové konstrukce	21
3.1. Rovinné rámy	21
3.1.1. Vetknuté rámy	23
3.1.2. Dvojkoubové rámy	23
3.1.3. Trojkoubové rámy	24
3.2. Prostorové konstrukce	24
3.2.1. Halové konstrukce	24
3.2.2. Rotační rámové konstrukce	25
4. Typy rámových rohů	26
4.1. Rámový spoj pomocí tlačných a tažených prvků	27
4.1.1. Vzpěra v místě spoje stojky a příčle	27
4.1.2. Řešení pomocí zdvojené stojky ve tvaru V	28
4.1.3. Příhradová konstrukce	29
4.2. Zakřivený rámový roh	29
4.3. Lepený rámový roh	31
4.4. Svorníkový rámový roh	33
4.5. Svorníkový roh s ocelovými plechy	36
4.6. Rámové rohy s vlepovanými tyčemi	37
4.7. Modifikované rámy	38

5. Příklad výpočtu rámového rohu.....	39
5.1. Geometrie a zatížení rámové konstrukce.....	39
5.2. Výpočet vnitřních sil v místě rámového rohu.....	39
5.3. Návrh přípoje.....	40
5.3.1. Návrh svorníků.....	40
5.3.3. Vstupní údaje.....	44
5.4. Návrh a posudek dřevěných prvků.....	47
5.4.1. Příčel.....	47
5.4.2. Stojka.....	49
5.5. Návrh a posudek dřevěných prvků s vlivem objemových změn, způsobených vlhkostí.....	52
- například třída provozu 3.....	52
5.5.1. Výpočet zatížení, od zamezení smršťování.....	52
5.5.2. Posouzení tahu kolmo k vláknům.....	52
5.5.3. Vstupní údaje.....	53
6. Analýza spoje pomocí programu SCIA Engineer	56
6.1. Model přípoje s jednou styčnickovou deskou	56
6.1.1. Dřevěné prvky.....	56
6.1.2. Styčnicková deska a vnesení vlivu smršťování.....	57
6.1.3. Svorníky	58
6.1.4. Umístění podpor a silového zatížení	58
6.2. Výstupy z programu.....	59
6.2.1. Rámový spoj v 1. třídě prostředí	59
6.2.2. Rámový spoj s uvážením smršťování	61
6.2.3. Rámový spoj s uvážením smršťování	61
s rozdělenou styčnickovou deskou.....	61
7. Závěr	63

1. Materiálové řešení dřevěných konstrukcí

Kapitola materiálového řešení je zde zařazena z důvodu rozdílných vlastností dřevěných konstrukcí a konstrukcí na bázi dřeva a pro nastínění alespoň základního chování těchto konstrukcí.

1.1. Rostlé dřevo

Rostlé dřevo je jedním z nejdéle používaných stavebních materiálů. Díky jeho vlastnostem i velké dostupnosti bylo po staletí hojně využíváno. V dnešní době tento materiál v konstrukcích získává stále větší pozornost a popularitu, a to hlavně z důvodu svých ekologických a estetických vlastností. Rostlé dřevo dělíme na listnaté a jehličnaté, přičemž pro stavební konstrukce se v drtivé většině používá dřevo jehličnaté, v Evropě konkrétně smrk. Pro svou nízkou uhlíkovou stopu je ve srovnání s jinými konvenčními materiály, jako ocel a beton, mnohem méně náročné na životní prostředí při těžbě, zpracování i recyklaci.

Dřevo je přirozeně pevné a zároveň lehké, což umožňuje snadnou manipulaci a montáž. Problémem rostlého dřeva ovšem zůstává různorodost jeho vlastností a i při pečlivém třídění takřka nemožnost garantovat přesnější hodnotu meze porušení. Při návrhu se tedy uvažuje bezpečná hodnota, přičemž skutečná pevnost může být i několikanásobně vyšší. Velmi také záleží, jestli se jedná o dřevo listnaté nebo jehličnaté a na jeho objemové hmotnosti. Čím vyšší je totiž objemová hmotnost, tím vyšší je pevnost. Pro svou pružnost je při navrhování dřevěných konstrukcí mnohdy rozhodující mezní stav použitelnosti a mezní hodnoty průhybů.

Stejně jako u každého jiného materiálu, je i u dřeva třeba dbát na správný návrh a provedení konstrukčních detailů. Dřevěné konstrukce jsou velmi náchylné na působení vlhkosti. Ideální vlhkost je 12 – 15 % pro vnitřní použití a 16 – 19 % pro vnější. Platí také, že dřevěné konstrukce by měly mít při montáži zhruba takovou vlhkost, jaké budou vystaveny po dobu svého působení. Vysoká vlhkost znamená nebezpečí napadení biologickými škůdci a v případě zamezení volných objemových změn také rozštěpení prvku.

Ochrana před působením vlhkosti se provádí pasivně (konstrukčními opatřeními, které chrání dřevo před tím, aby se k němu voda vůbec dostala) nebo aktivně (nátěry a postřiky, chránící konstrukce před samotným působením vlhkosti). Při správném provedení těchto opatření je dřevo schopno vydržet i stovky let. Obzvláště při návrhu dřevostavby je třeba dbát na správný požární návrh. Není třeba zmiňovat, že dřevo je velmi hořlavý materiál a proto je dobré již v začátcích návrhu myslet na řešení požárního návrhu.

Ve stavební praxi je rostlé dřevo využíváno ve formě řeziva, kdy jsou kmeny stromů zpracovávány převážně na latě, desky, fošny a hranoly. Na konci minulého století bylo v Německu z důvodu potřeby garance lepší kvality řeziva, výrobní vlhkosti,

standardizace rozměrů a definování povrchové kvality, definováno konstrukční dřevo, známo dnes pod zkratkou KVH® (normovaný výrobek). Tyto profily se vyrábějí v různých průřezích a délkách, kdy jsou napojovány zubovým spojem. Dalším produktem z rostlého dřeva, je GLT® profil. Prvek z masivního dřeva, který je navíc prochází tahovou zkouškou.

Pro moderní a nestandardní konstrukce může být rostlé dřevo z kterýchkoliv výše zmíněných úskalí nevyhovující, proto byly v posledních dekadách vyvíjeny a následně zdokonalovány úpravy, jimiž šlo některé z negativních vlastností dřeva omezit, či zcela eliminovat. Rozvoj moderních technologií, umožňuje vytváření složitých a efektivních konstrukcí z rostlého dřeva, které splňují nebo překračují standardy a předpisy v oblasti stavebnictví. [3] [4] [5] [11]

1.2. Lepené lamelové dřevo

V reakci na pevnostní nestabilitu a omezenost délkových rozměrů, bylo postupně vyvinuto lepené lamelové dřevo. Od prvních pokusů na konci 19. století v Rakousku (např. most v Gmundenu – 1892 a lávka ve Vídni - 1906) přes zdokonalování v průběhu 20. století (obzvláště ve Skandinávii, Švýcarsku a Rakousku) byl vyvinut konstrukční materiál s pevnostní stabilitou a velkými délkovými i rozměrovými možnostmi při zachování ostatních kladných vlastností rostlého dřeva.

Lepené lamelové dřevo (zkráceně LLD, z angl. termínu *Glued Laminated Timber - GLT*), je konstrukční materiál vyráběný spojováním jednotlivých lamel pomocí lepidla. Tloušťka lamel se pohybuje mezi 40 až 50 mm, přičemž pro ohýbané konstrukce se používají lamely o tloušťce 20 až 30 mm. Délka lamel se pohybuje v rozmezí 1,5 - 5 m. Pro výrobu LLD se v praxi převážně používá měkké dřevo, ale při užití správného lepidla lze použít téměř jakékoliv dřeviny. Lamely mají mít maximálně 15 % vlhkost (z důvodu použití lepidel), nadstavují se lepeným zubovým spojem a frézují. Následně dojde k jejich lepení, kdy jsou uloženy vedle sebe a lisují se. Díky lisování je možno výsledné prvky tvarovat a ohýbat do požadovaných tvarů. Pevnost prvků z LLD je ovlivněna pevností zubových spojů a množstvím vad v rostlém dřevě. Jinými slovy výslednou pevnost prvku určuje pevnost nejslabšího místa, kterým bývá buď zubovitý spoj, nebo místa se suky. Díky této technologii lze vytvářet dřevěné prvky s proměnlivým průřezem po délce.

Dnes je lepené lamelové dřevo běžně používáno ve stavebnictví po celém světě a je považováno za důležitý a spolehlivý konstrukční materiál s širokým spektrem aplikací. Dle [5] str. 83 je v porovnání pevnosti ku hmotnosti LLD dokonce pevnější než ocel. [3] [5] [11]

1.2.1. Zakřivené nosníky

Díky vrstvení jednotlivých lamel lze vytvářet konstrukce s velkou variabilitou tvarů. Docílíme tím buď ohýbáním a následným slepováním jednotlivých lamel, nebo vytvořením vyšších průřezů, ze kterých jsou následně vyfrézovány požadované tvary.

1.2.2. CLT

Z LLD jsou vyráběny také plošné konstrukční prvky. Obzvláště v poslední době se velkému zájmu těší tzv. CLT panely (Cross laminated timber – křížem lepené dřevo). Tyto desky jsou tvořeny z příčně lepených vysoušených vrstev rostlého dřeva. Výsledné panely jsou velmi tuhé a běžně se používají pro stavbu vícepodlažních objektů. Díky možnosti prefabrikace se vyznačují objemovou stálostí, standardizovanými rozměry nebo rychlostí výstavby. Na rozdíl od betonových panelů jsou velmi lehké (cca 1/5 hmotnosti) a mají mnohem lepší tepelně technické vlastnosti. Lze je navíc použít pro svislé, vodorovné, ale také šikmé konstrukce. [3] [12]



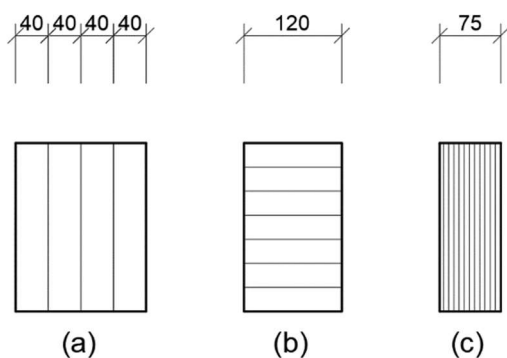
Obr. 1: CLT panel NOVATOP STATIC [12]

1.3. Materiály na bázi dřeva

Dále jsou v této práci, alespoň krátce zmíněny nejběžnější materiály na bázi dřeva, které bývají využívány k realizaci rámových rohů. Další materiály nejsou hlavním předmětem práce, a proto jsou zde zmíněny pouze stručným výčtem

1.3.1. Vrstvené dřevo

V průběhu výzkumu a procesu zdokonalování výroby, byl vyvinut další konstrukční materiál z tenkých vrstev dřeva – vrstvené dřevo (dále jen LVL). Při lepení dochází k lisování a tím i k větší eliminaci konstrukčních vad dřeva. Výsledný materiál má ještě vyšší pevnost, odolnost a díky nižšímu obsahu vlhkosti objemovou stálostí. Pevnost LVL závisí převážně na použitém lepidlu a konstrukční vady dřeva již nehrají takovou roli. [3]

**Obr. 2:** Průřezy se stejnou únosností v ohybu

(a) Rostlé dřevo (C24)

(b) LLD (GL32)

(c) vrstvené dřevo (LVL)

1.3.2. Parallam

Z důvodu možného použití pro nosné konstrukce je v této práci stručně zmíněn také parallam. Jedná se o materiál, pro který je již třeba použít dřevo tvrdších dřevin (douglaska, topol). Výroba spočívá v lepení a lisování tenkých pásků dýh. Výsledný materiál pak má obdobnou pevnost v ohybu jako LVL, ale pevnost v tlaku a smyku je vyšší. Vzniklý masivní prvek má vysokou požární odolnost a vlastnosti podobné železobetonu. [13]

**Obr. 3:** Parallam nosník [13]

1.3.3. OSB desky

OSB, celým názvem Oriented strand board, je deskový materiál s plochými třískami délek 50 – 75 mm, který byl vyvinut v Německu. Třísky jsou lepeny a lisovány, přičemž musí být uspořádány ve třech vrstvách. Dvě jsou povrchové vrstvy uspořádány rovnoběžně s podélným směrem a prostřední, směrem kolmým. Oproti rostlému dřevu mají tyto desky vyšší rozměrovou stabilitu. Obecně platí, že čím menší jsou součásti desky, tím menší je pevnost v ohybu. OSB desky mají větší tendenci k dotvarování. Vlastnosti desek velmi závisí na jakosti provedení. Desky od různých výrobců mívají často různé vlastnosti. [3]

1.3.4. Překližka

Materiál tvořený lepením a lisováním dýh, které se získávají postupným loupáním z kmenů. Pro výrobu jich musí být použit lichý počet, přičemž jednotlivé vrstvy se kladou napříč. Velký rozvoj byl zaznamenán na počátku 20. století, kdy byla překližka zkoumána převážně pro letecký průmysl. Ve stavebnictví je nejčastěji používána ve formě deskového materiálu (styčnickové desky, stojiny nosníků, či dřevěné panely). [3]

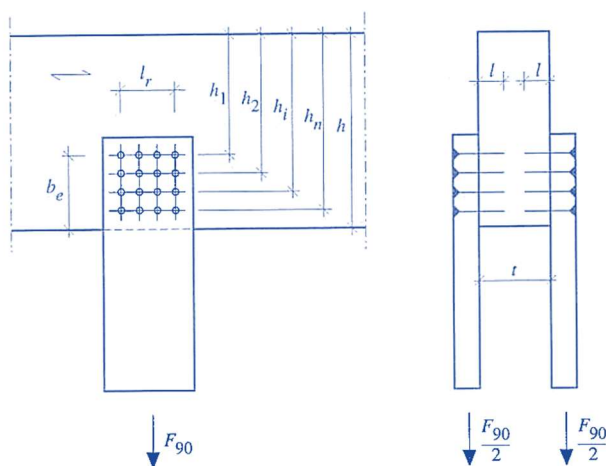
2. Spoje dřevěných konstrukcí

Spoje dřevěných prvků jsou často kritickou částí dřevěných nosných konstrukcí. Výrazně ovlivňují únosnost a stabilitu celé konstrukce, ale je třeba brát v potaz také ekonomickou stránku. Spoje totiž často bývají nejdražším místem celé konstrukce.

Ekonomické hledisko zahrnuje jak spojovací prostředky a náklady na zhotovení, tak cenu a možnosti přepravy. Pro dostatečnou pevnost a funkci je třeba věnovat velkou pozornost kontrole jakosti provedení a dodržování daných tolerancí. Při návrhu je tedy třeba brát v úvahu mnoho parametrů a úskalí.

Spoje se téměř vždy nacházejí v místě přerušení nebo narušení vláken. Tato místa mnohem snadněji podléhají účinkům spojeným s negativními vlivy vlhkosti. V těchto místech dochází k četnějšímu výskytu kvůli střídavému navlhání a vysoušení. To vede ke vzniku větších dlouhodobých deformací. Obecně lze říct, že přetvárné chování mechanických spojů je většinou vyvozováno změnami klimatu a relativních vlhkostí okolního prostředí.

Typickým mechanickým problémem spojů je malá únosnost dřeva v tahu kolmo k vláknům, které mohou redukovat celkovou únosnost spoje. Toto napětí zpravidla působí v kombinaci se smykovým a podélným napětím, a to zejména u příčných přípojí. Při ověřování únosnosti se pak postupuje pomocí metody lomové mechaniky podle ČSN EN 1995-1-1. Celkovou pevnost přípoje lze pozitivně ovlivnit umístěním spojovacích prostředků co nejvíce k nenamáhanému okraji prvku, rozdělením spojovacích prostředků na co největší plochu a samozřejmě případným zvětšením průřezu nosníku. [3] [5]



Obr. 4: Přípoj namáhaný tahem kolmo k vláknům [3] (str. 318)

Obecně je tedy při návrhu spoje snaha vyhýbat se složitým detailům, které by mohly způsobovat smyk nebo tah kolmo k vláknům a zároveň riziko kondenzace. Snaha by měla být o maximální využití pevnosti v tlaku. [7]

2.1. Spoje podle tuhosti

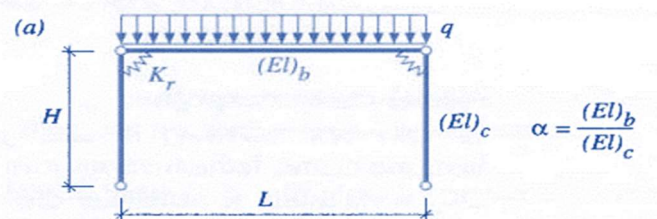
Spoje dřevěných konstrukcí dělíme podle schopnosti přenášet ohybové namáhání na tuhé, poddajné a kloubové. Výpočetní model by měl zohledňovat tuto tuhost spoje, ovlivňující přetvárné chování a mnohdy i rozložení vnitřních sil, a proto je vliv této tuhosti do výpočtu vnesen součinitelem β_r , pomocí něž je pak určena torzní pružinová tuhost K_r .

$$K_r = \beta_R \cdot \frac{EI}{L}$$

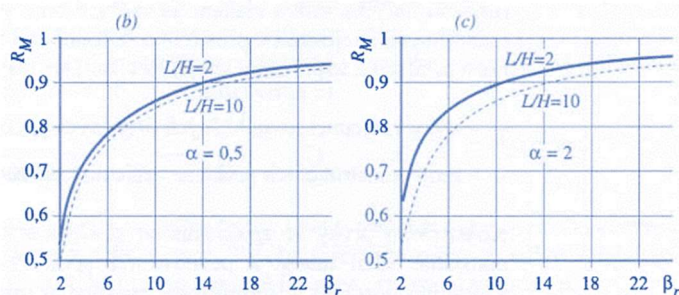
Účinnost spoje je pak dána součinitelem R_M , udávajícím poměr rohového momentu na absolutně tuhém rámu k momentu vypočtenému s vlivem poddajnosti při zanedbání přetvoření od účinku osových a posouvajících sil – M_j .

$$M_j = \frac{q \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1,5 + \alpha \cdot \frac{H}{L} + \frac{3}{\beta_R}}$$

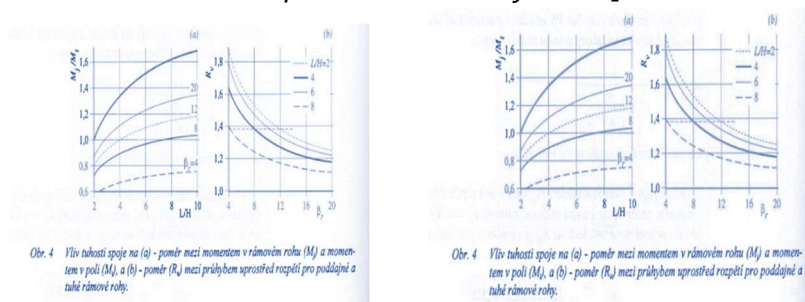
Na základě součinitele $\beta_r = 8-12$ a poměru $R_M \geq 0,85$, lze uvažovat rámový roh jako tuhý a pro kloubové působení $\beta_r = 0,5$ a $R_M \leq 0,2$. V ostatních případech je nutno uvážit poddajnost spoje. Vhodnou volbou poddajnosti rámového rohu lze ovlivnit přerozdělení momentů ve spoji a příčli a docílit tak větší hospodárnosti konstrukce. [3]



Obr. 5: Geometrie rámu [3] (str. 422)



Obr. 6: Průběh poměrné hodnoty R_M [3] (str. 422)



Obr. 4 Vliv tuhosti spoje na (a) - poměr mezi momentem v rámovém rohu (M) a momentem v poli (M_j) a (b) - poměr (R_M) mezi průhybem vprostředí rozpětí pro poddajné a tuhé rámové rohy.

Obr. 4 Vliv tuhosti spoje na (a) - poměr mezi momentem v rámovém rohu (M) a momentem v poli (M_j) a (b) - poměr (R_M) mezi průhybem vprostředí rozpětí pro poddajné a tuhé rámové rohy.

Obr. 7: Vliv tuhosti na poměr mezi momentem v rohu a v poli (vlevo), vliv na poměr průhybů pro tuhé a poddajné spoje (vpravo) [3] (str. 422)

2.1.1. Kloubové spoje

Jako kloubové spoje většinou označujeme nejpoddajnější řešení spojů, u nichž lze počítat s minimální tuhostí v natočení a tedy zanedbatelným přenosem momentového zatížení, např. tesařské konstrukce a spoje pomocí kolíkových prostředků. Tyto spoje neumožňují navrhovat samostatné subtilní prvky na větší rozpětí a je nutno absenci ohybové tuhosti dohnat rozměrem průřezu prutu nebo množstvím dalších prvků. [3][5][7]



Obr. 8: Příklad tuhé roznášecí hlavice z několika dílčích prvků [14]

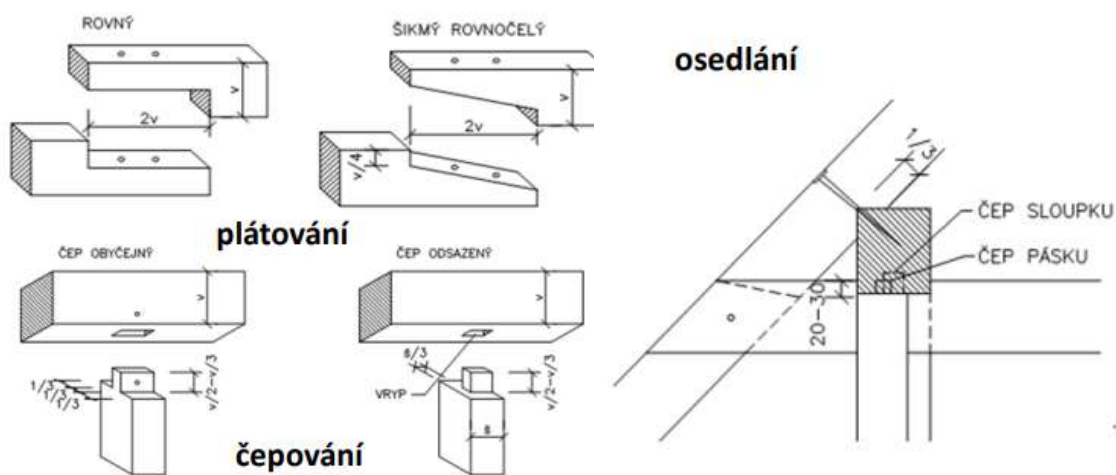
2.1.2. Tuhé/momentové spoje

Tuhé spoje rámových rohů jsou podrobněji popsány v kapitole 3. Dřevěné rámové konstrukce a 4. Typy rámových rohů.

2.2. Spoje podle způsobu provedení

2.2.1. Klasické tesařské konstrukce

Tesařské konstrukce jsou nejtypičtějším způsobem spojování dřevěných prvků při zastřešování objektů. Vnitřní síly jsou z jednotlivých prvků přenášeny účinkem tlaku a tření v uzlových bodech konstrukce. K zabezpečení polohy těchto prvků je často použito i jiných spojovacích prostředků. Vyskytují se dva základní druhy spojů – příčně a rovnoběžně s vlákny. Existuje nepřeborné množství tvarových provedení těchto variant, všechny ale vycházejí z těchto základních variant: [3] [5] [15]

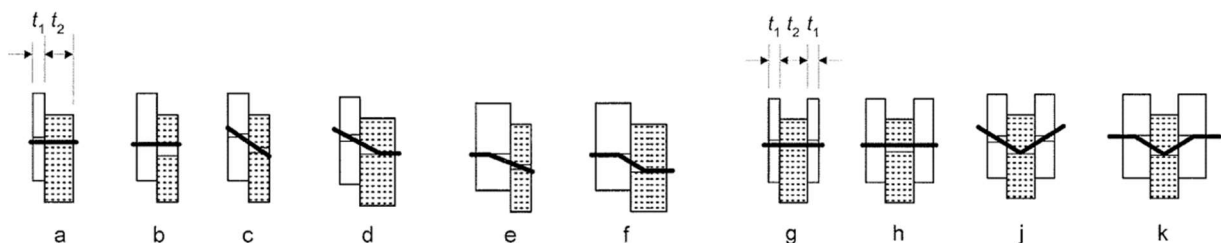


Obr. 9: Příklady klasických tesařských spojů [15]

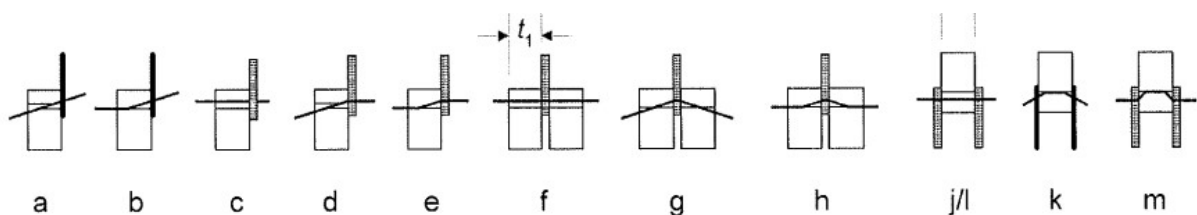
2.2.2. Kolíkové spoje

Tyto mechanické spoje využívají příčného propojení nosných prvků pomocí menších, smykově působících prvků „kolíku“. Únosnost se v minulosti určovala na základě krátkodobých zkoušek a průměrná únosnost se pak vydělila bezpečnostním součinitelem, který zohledňoval jakost výroby a dobu zatížení, čímž byla získána teoretická únosnost. Tyto zkoušky však nepostačovaly požadavkům Eurokódu 5. Kvůli množství rozmanitých variant nepřicházely v úvahu ani zkoušky reprezentativních spojů. Byly tedy vyvinuty teoretické modely, na základě nichž je možné stanovit charakteristické hodnoty únosnosti. Vzorce pro výpočtovou únosnost byly publikovány v Johansenově teorii roku 1949. V závislosti na geometrii a vlastnostech konstrukčních materiálů byly stanoveny základní mechanismy porušení. Bylo také zjištěno, že u spojů ocel-dřevo a dřevo-dřevo se projevují jiné mechanismy porušení a je tedy nutno aplikovat jiné výpočty. Pro spoje dřevo-dřevo se jako kritické ukázaly být otláčení stěny otvoru dřeva a vznik plastického kloubu kolíku. Pro spoj ocel-dřevo je únosnost závislá na tloušťce ocelové desky, a to zejména u jednostřížných spojů, kdy se větší tloušťky projevují lepší fixací svorníku v otvoru a zabrání jeho natočení.

Dle ČSN EN 1995-1-1 jsou pro tenkou desku typické mechanismy porušení *a*, *b* a pro tlustou desku *c*, *d*, *e*, přičemž hranice pro tenkou desku je polovina průměru kolíku a pro tlustou tloušťka větší nebo rovna průměru kolíku. Pro ocelové plechy tloušťek v rozmezí $0,5d-1d$ se únosnost stanoví interpolací. Vzorce pro výpočet únosnosti jednoho spojovacího prostředku jsou uvedeny ČSN EN 1995-1-1. [1] [3] [5] [6] [7]



Obr. 10: Základní mechanismy porušení pro spoje dřevo-dřevo [1](str. 422)



Obr. 11: Základní mechanismy porušení pro spoje ocel-dřevo [1] (str. 422)

V průběhu modernizace byla vyvinuta velká škála těchto spojovacích prostředků.

2.2.2.1. Dřevěné kolíky

Kolíky jsou v tomto případě z tvrdého dřeva a vysoušeny na nízký obsah vlhkosti. Po zatlučení do předvrtaných otvorů pak dojde k jejich nabobtnání, čímž se ještě pevněji zafixují a vznikne tak spoj, který se vyznačuje svou duktilitou. [3] [16]



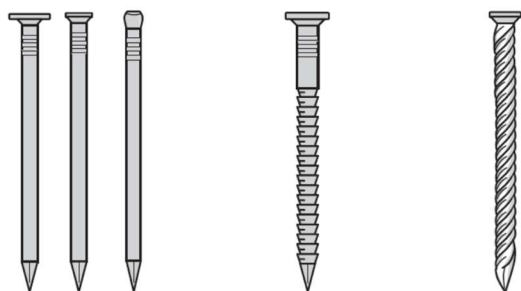
Obr. 12: Příklady použití dřevěných kolíků [16]

2.2.2.2. Hřebíky

Hřebíkové spoje jsou nejpoužívanějším spojovacím prostředkem v dřevěných konstrukcích, zejména pak pro menší konstrukce. Existuje velké množství hřebíků, nejčastěji je používán hladký hřebík z drátu s minimální pevností 600N/mm^2 .

Únosnost ve stříhu lze vylepšit vyválním drážek a závitů nebo vytvoření šroubovitěho zakroucení dřívku (Obr. 13).

Hlavním problémem hřebíkových spojů je riziko rozštěpení při zarážení do dřeva s vysokou objemovou hmotností. Tento problém je možné redukovat předvrtáním otvoru odpovídajícím 80% průměru dřívku. Lze tím docílit větší únosnosti na stříh, redukcí požadovaných stanovených vzdáleností a menšímu posunu ve spoji vlivem zatížení. Hřebíky mohou být namáhány také ve směru dřívku, jejich únosnost je však velmi nízká. [3] [7]



Obr. 13: Možnosti úprav dřívku hřebíku [7]

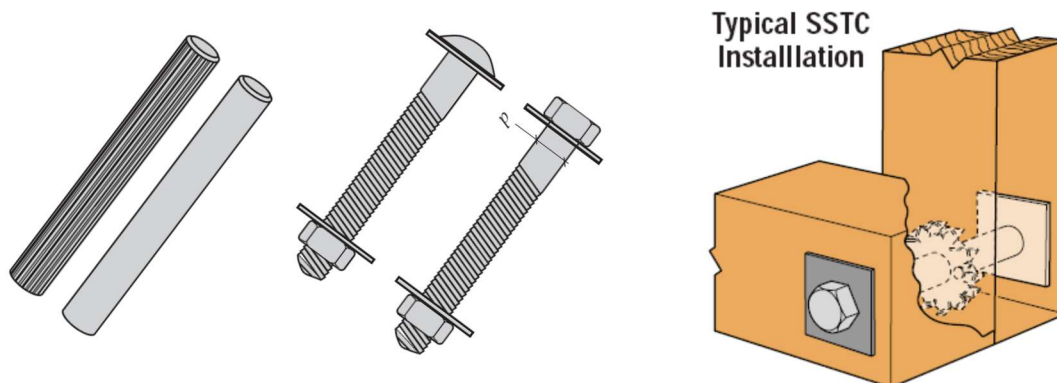
2.2.2.3. Svorníky a ocelové kolíky

Svorníky jsou ocelové kolíkové spojovací prostředky kruhového průřezu se závitěm, hlavou a maticí. Prvky bez závitě jsou nazývány kolíky. Oba prostředky bývají průměru do 30 mm a mimo přenos zatížení stříhem je lze použít také pro osové zatížení. Osazují se do předvrtaných otvorů s o 1 milimetr větším poloměrem, nebo se zarážejí do děr se stejným poloměrem (kolíky). Na každou stranu se osazují podložky s alespoň třikrát větším průměrem a přes závit se sešroubují. Únosnost spoje je dána mj. průměrem, množstvím a samozřejmě rozmístěním svorníků (Obr.: 14). [3] [7]

Vzdálenost	Svorníky, kolíky	Vkládané hmoždíky	Zalisované hmoždíky
Od konce, namáhaný okraj	$7d$	$2 d_c$	$1,5 d_c$
Od okrajů	$4 d$	d_c	d_c
Mezi spojovacími prostředky: uvnitř kruhu popř. obdélníku	$6 d$	$2 d_c$	$1,5 d_c$
mezi kruhy popř. obdélníky	$5 d$	$1,5 d_c$	$1,5 d_c$

Obr. 14: Odstupy kolíků od konců, okrajů a mezi sebou v závislosti na průměru [3]

Svorníky často bývají používány v kombinaci se vkládanými a zalisovanými hmoždíky, které jsou následným dotažením svorníků sepnuty.



Obr. 15: Schématické znázornění svorníků [7]

2.2.2.4. Vrutý

Dalším spojovacím prostředkem pro jednoduché spojování dřevěných prvků s ocelovými, případně s deskami na bázi dřeva jsou vruty. Jedná se o jednoduše aplikovatelný spoj. Při namáhání na stříh zpravidla vykazují menší únosnosti než hřebíky stejných jmenovitých průměrů, a to zejména do průměru 8 mm. Pro vruty průměrů větších než 5 mm se doporučuje předvrtat otvory o průměru $0,7d$. Ovšem při namáhání na vytažení lze počítat přenosem velkých sil.

2.2.3. Spoje prováděné pomocí prvků kování

2.2.3.1. Spoje s tvarovými součástmi z ocelového plechu

Pro účely rychlého a jednoduchého připoje dřevěných prvků bylo vyvinuto množství tvarových variant jednotlivých spojovacích ocelových komponent.

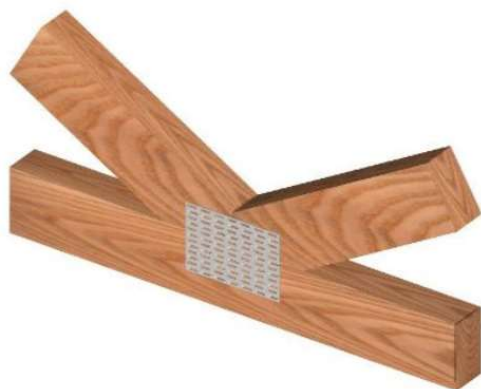
Při jejich návrhu je však nutno brát v potaz více mechanismů porušení a nelze tak posoudit pouze únosnost spojovacích prostředků. Je třeba mít na zřeteli také porušení průběžného prvku kolmo k vláknům, možnost vzniku plastického kloubu ocelového plechu a kombinaci namáhání hřebíků na stříh a vytažení. [3] [7]

2.2.3.2. Prolisované desky gang-nail

Spoje jsou provedeny pomocí kovových pozinkovaných desek tloušťky 0,9 - 2,5 mm s jednosměrně prolisovanými trny, působící jako styčnicková deska. Dnes jsou velmi oblíbeným řešením spojů v jedné rovině. Vyskytují se v mnoha tvarových variantách. Mez únosnosti je dána buď dosažením únosnosti trnů v jednom z připojovaných prvků, nebo porušením plechu. Při posuzování záleží zejména na úhlu α mezi směrem síly a hlavním směrem desky, úhlu β mezi směrem síly a směrem vláken, efektivní ploše desky v kontaktu s dřevěným prvkem, vzdálenosti mezi těžištěm desky a nejbližším bodem desky, úhlu γ mezi podélným směrem desky a spárou dřeva a délkou desky. Jednotlivé charakteristické pevnosti je pak třeba určit na základě zkoušek. [3] [7]

Pro návrh desek byla v ČSN EN 1995-1-1 stanovena některá základní pravidla, například přenesení maximálně polovičního účinku tlakové síly deskou v tlačeném přípoji (zbytek je přenesen kontaktem tlačených prvků), minimální překryv deskou 40 mm nebo třetinu výšky prutu, nebo zajištění přenesení minimální síly, ve kterémkoliv směru. [1]

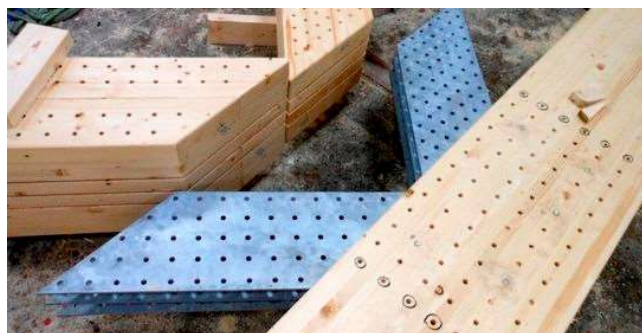
I v tomto spoji je třeba uvažovat s jistým posunutím, a to buď předepsanými hodnotami posunutí u_{ser} , nebo na základě modul K_{ser} , stanovené na základě zkoušek.



Obr. 16: Styčnicková prolisovaná deska gang-nail [17] [7]

2.2.3.3. Greim bau

Také tento spoj je realizován pomocí ocelových styčnickových desek, vkládaných do zářezů ve dřevěných prvcích a propojených pomocí kolíkových prostředků. Pomocí tohoto spoje lze realizovat tuhé konstrukční spoje téměř všech typů konstrukcí. [7]



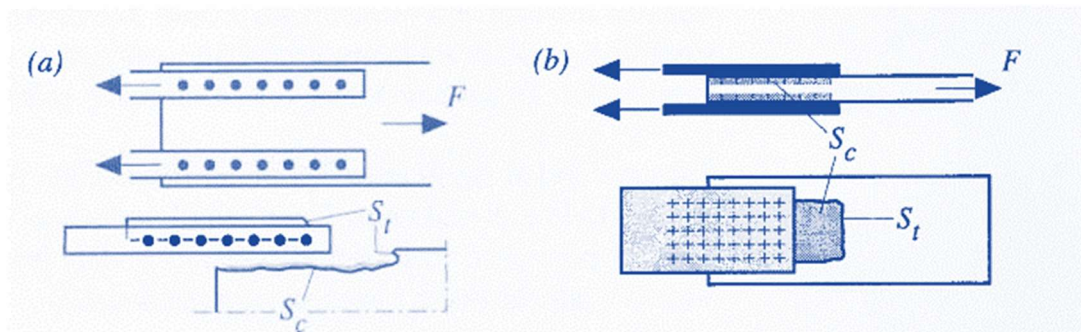
Obr. 17: Spoj pomocí vkládaného ocelového plechu greim bau [18]

2.2.4. Skupiny spojovacích prostředků

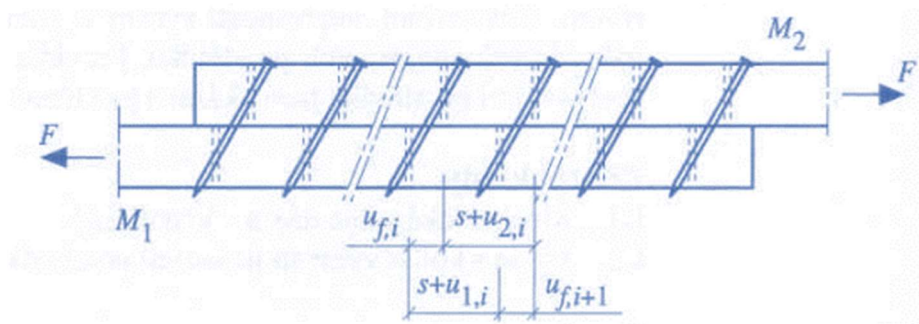
Mechanické spoje většinou obsahují více spojovacích prostředků a dochází tak k nerovnoměrnému přerozdělení zatížení. Toto přerozdělení je významně ovlivněno tuhostí jednotlivých spojovacích prostředků.

Pokud jsou spojovací prostředky uspořádány v řadě za sebou, pak je třeba redukovat únosnost odtržením části konstrukčního prvku, vlivem tzv. skupinového efektu. Toto blokové smykové porušení skupiny spojovacích prostředků vyplývá ze smykových napětí v jedné rovině a tahových napětí v rovině kolmé, tedy vyštípnutí spojovacích prostředků spolu s částí dřevěného prvku.

V ČSN EN 1995-1-1 byly stanoveny vzorce pro výpočet efektivního počtu spojovacích prostředků pro jednotlivé spojovací prostředky. S tímto jevem není třeba počítat v případě vrutů a hřebíků, které jsou umístěny střídavě kolem podélné osy. [1] [3]



Obr. 18: Blokové porušení spoje [3] (str. 314)



Obr. 19: Řez přetvořenou oblastí spoje [3] (str. 412)

2.2.5. Požární odolnost spojů

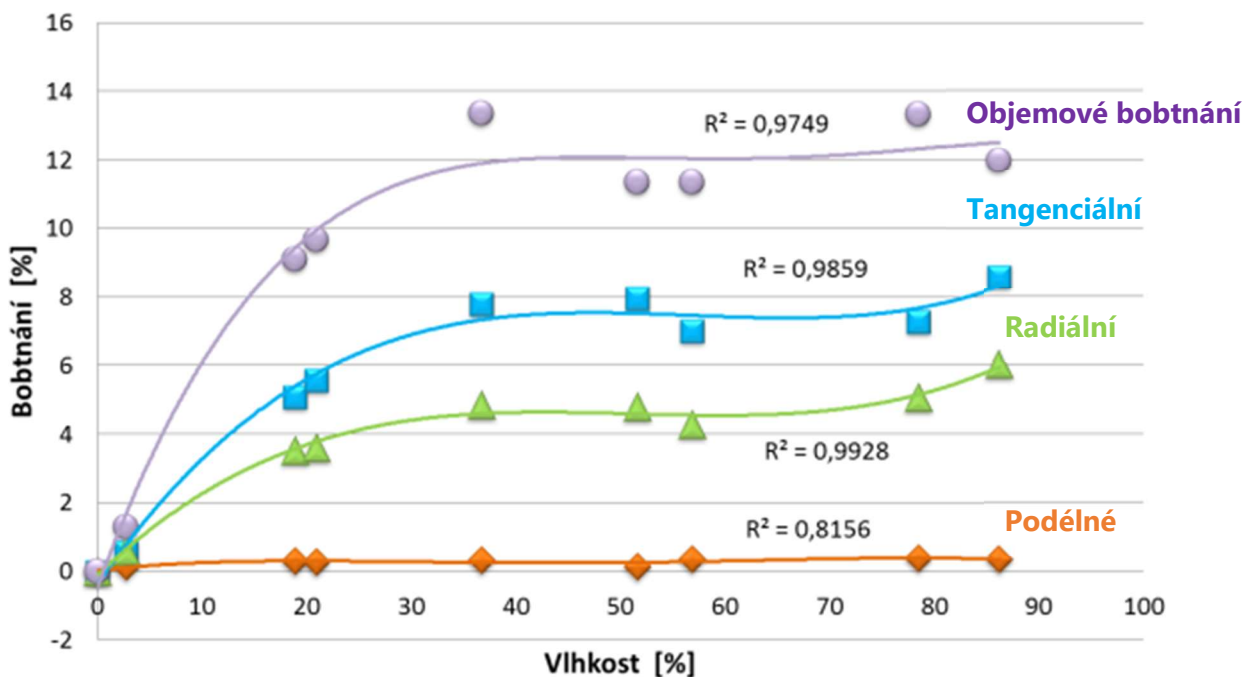
Působení požáru u spojů a přípojí je brán v potaz primárně u mechanických spojů s ocelovými spojovacími prostředky, jejichž únosnost se účinkem tepla výrazně snižuje. Pro jejich chování je rozhodující plocha nechráněného povrchu ocelových částí (svorníků, hřebíků, atd.), a proto je třeba tyto komponenty chránit dodatečným zakrytím nebo umístěním do dřevěného prvku. V EC5 je popsán postup návrhu protipožárního zabezpečení a minimálních velikostí dřevěných konstrukčních prvků pro příčně namáhané spoje. [2] [3]

2.2.6. Změny vlastností v průběhu životnosti

Dalším aspektem, který je třeba zohlednit je vliv vlhkosti a následného bobtnání. V průběhu klimatických změn se střídavě mění i vlhkost dřeva, což ovlivňuje nosné i přetvárné chování těchto prvků. Tyto časové změny únosnosti jsou do výpočtu zanášeny dle EC5 pomocí součinitelů k_{mod} pro únosnost a k_{def} pro přetvoření.

Pro správné fungování spoje je nutno brát v potaz také objemové změny dřevěného prvku vlivem změn vlhkosti. V přípocích, kde je zabráněno volnému bobtnání a smršťování, například vlivem ocelových spojovacích prostředků, mohou působit přidavné napětí v tahu kolmo k vláknům. Ty pak mohou vést ke vzniku trhlin. Větším problémem není bobtnání, u kterého dochází k roztahování tuhého prvku ale následné smršťování, kdy je zabráněno volnému posunu a dochází k tahovým namáháním. U rámových rohů by měla být oblast omezeného přetvoření redukována asi na jeden metr. [1] [3] [4] [6]

Také v této oblasti se projevují ortotropní vlastnosti dřeva. Obecně se udává poměr bobtnání v tangenciálním : radiálním : podélném směru 20 : 10 : 1. Dřevěné prvky vykazují objemové změny do vlhkosti cca 30%, kdy dojde k nasycení buněčných stěn.

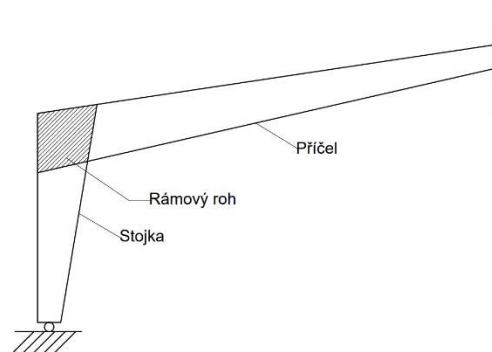


Obr. 20: Graf bobtnání dřeva v závislosti na vlhkosti [20]

3. Dřevěné rámové konstrukce

3.1. Rovinné rámy

Rámové konstrukce bývají hlavním nosným prvkem halových objektů. Rámovou konstrukci lze definovat jako konstrukci, spojenou v místě styku stojky a příčle tuhým rámovým rohem, schopným přenášet zatížení ohybovým momentem a tlakovými silami. Kvůli redukci ohybového momentu se udává ideální sklon příčle 14° (25%). Výška příčného řezu v rohu se empiricky udává jako $h_r = h/15 + l/30$, v podpoře $h_f = 0,7 h_r$ a $h_n = 0,3 h_r$. [X5.1.1]

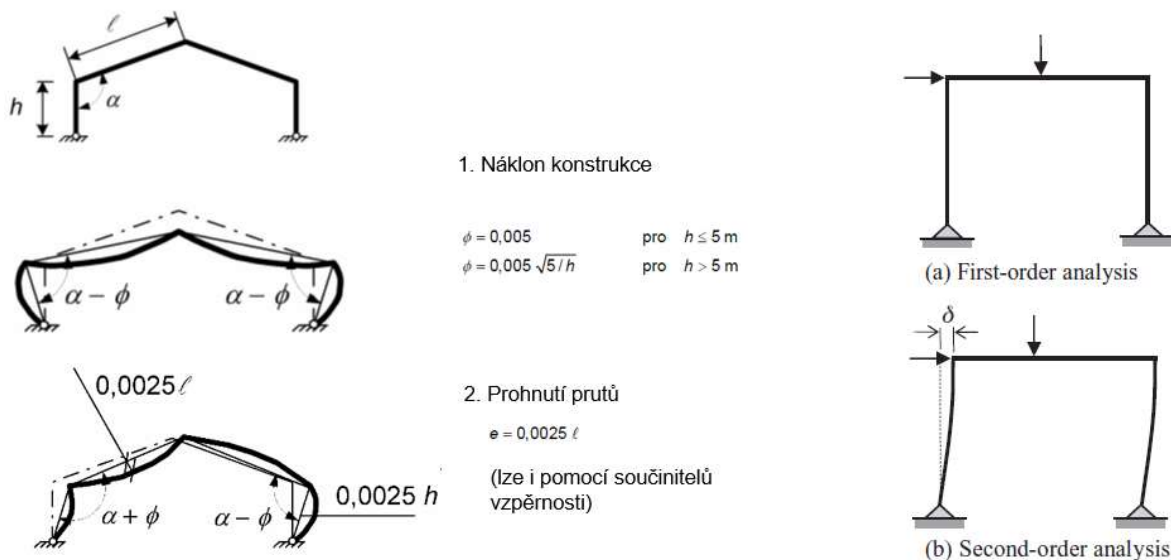


Obr. 21: Schéma konstrukce s rámovým rohem

Mezní stav únosnosti se stanoví dle ČSN EN 1995-1-1, kapitoly 6.2.3 a 6.2.4 (kombinace ohybu a osových sil) a 6.3 (Stabilita prvků).

Nosné působení konstrukce se má stanovit výpočtem účinků zatížení při použití lineárního modelu (pružné chování). Vzhledem k tomu, že jednotlivé prvky jsou spojovány spoji s jistou poddajností, celá konstrukce tím ztrácí na tuhosti, je třeba vzít tyto účinky v úvahu prostřednictvím modulu prokluzu K_u (viz. kap. 4. Typy rámových rohů) a modulem posunutí ve směru působící síly.

Pro výpočet rámu jako celku, je třeba také uvážit vlivy vynuceného průhybu, a to provedením lineární analýzy II. řádu. [1] [3] [8]

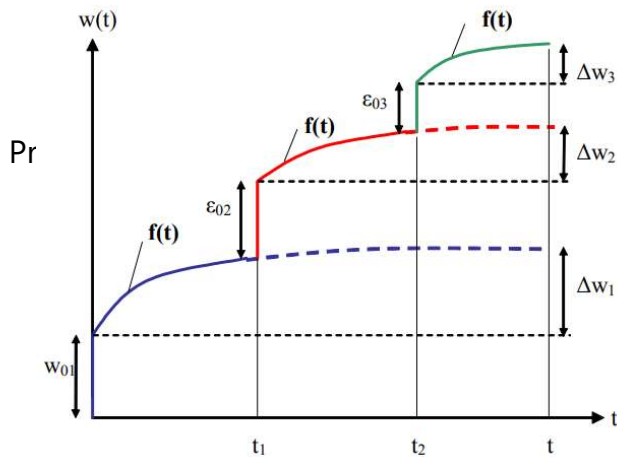


Obr. 22: Zavedení imperfekcí pro výpočet dle teorie II. řádu [1]

Pro posouzení mezního stavu použitelnosti se používají okamžité (v čase $t = 0$) a konečné ($t = \infty$) přetvoření konstrukce. Ty ve výsledku nemají překročit předepsané hodnoty. Okamžité průhyby se vypočtou jako suma přetvoření od jednotlivých zatížení.

Na rozdíl od jiných typů konstrukce se dřeva nezanedbává smykový modul G , a to kvůli malému poměru $G:E \cong 1:16$. U dřevěných konstrukcí v průběhu času dochází vlivem poklesu modulu pružnosti E ke vzniku dodatečných deformací, označovaných jako w_{creep} . Vliv dotvarování od více zatížení je zohledněn koeficientem k_{def} (viz Eurokód 5) a koeficientem trvání zatížení ψ_2 . Konečný průhyb w_{fin} je dán součtem okamžitého průhybu w_{inst} a průhybu vlivem dotvarování w_{creep} . [3] [6] [8]

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = w_{inst} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def})$$



Obr. 23: Funkce dotvarování [5] (str. 121)

Obr. 24: Boltzmanovo kritérium superpozice, znázorňující skladby dílčích průhybů [5] (str. 121)

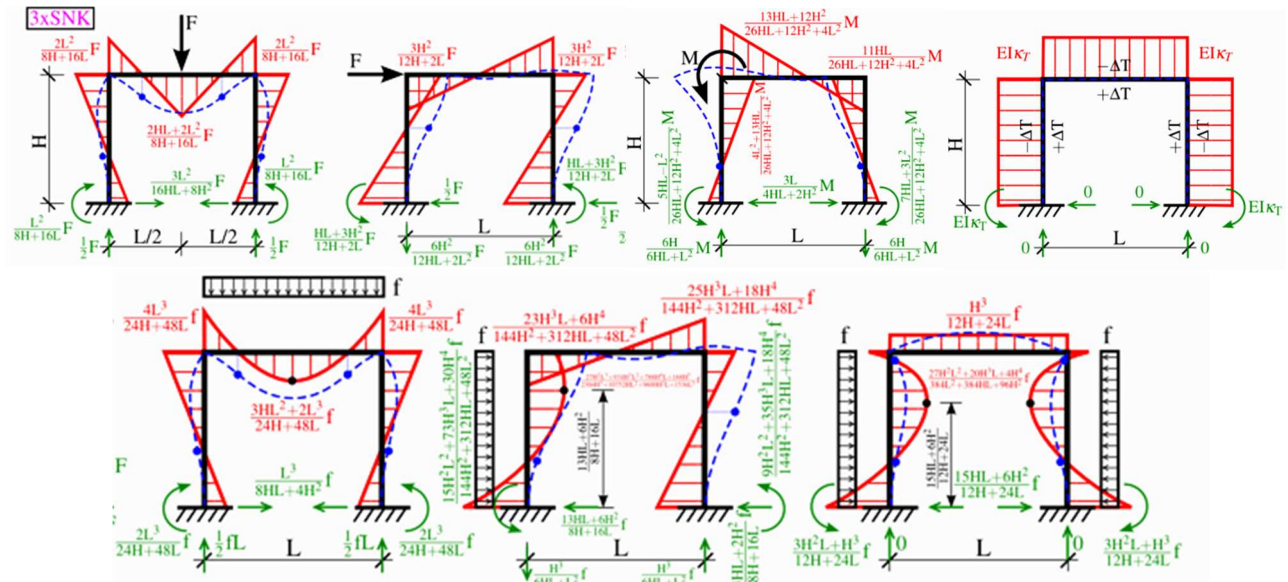
Existují tři základní typy rovinných rámových konstrukcí. Vetknuté, dvoukloubové a trojkloubové rámy. Každý z nich vykazuje jiné průběhy vnitřních sil a jsou jinak náchylné k poddajnosti tuhých spojů. Přičemž z důvodu finanční náročnosti realizace vetknutí a možného dodatečného namáhání konstrukce vlivem dotvarování spojů se pro dřevěné konstrukce nejčastěji používají poslední dva.

Volbu řešení ovlivňují, kromě samotného statického působení, také možnosti dopravy jednotlivých nosných prvků. Jsou případy, kdy by danou konstrukci bylo možné jen obtížně dopravit v celku a je tedy třeba ji přepravit v částech. Následný spoj je pak jednodušší provést pomocí kloubu.

Naproti tomu však stojí rostoucí náklady na lidskou práci, klimatické podmínky při realizaci a důraz na prefabrikaci, obzvláště u lepených rohů. Proto je třeba již při návrhu zvážit všechny aspekty, ovlivňující výstavbu a správnou funkci konstrukce. [3] [4]

3.1.1. Vetknuté rámy

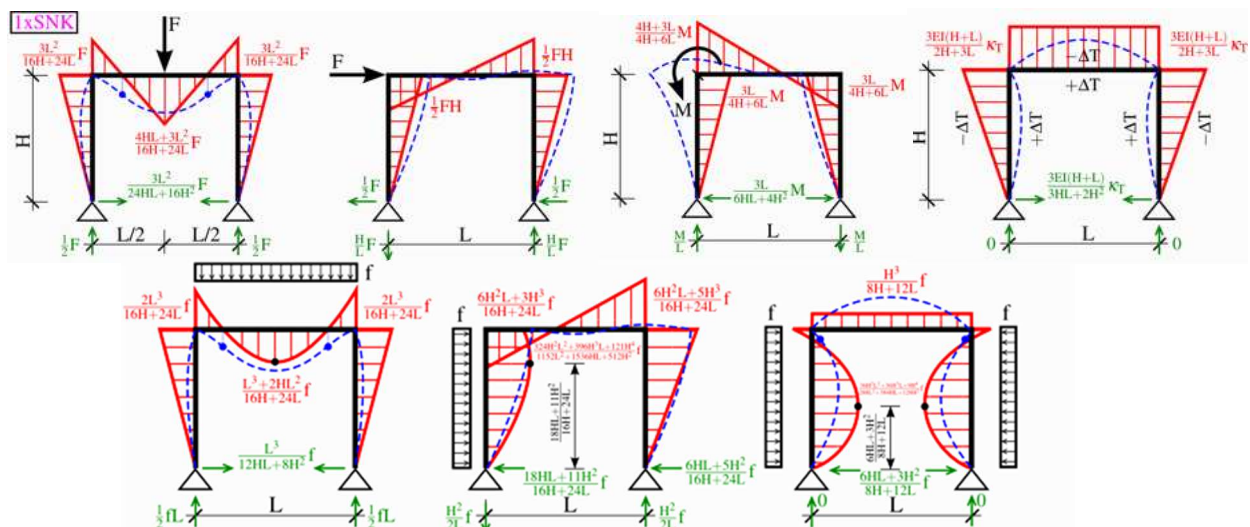
Vetknutý rám je navržen jako bezkloubová, třikrát staticky neurčitá konstrukce. Je velmi tuhá a bývá nejnáchylnější k natočením a posunům ve spojích a podporách a objemovým změnám. V provedení pomocí dřevěných konstrukcí je tedy tato varianta velmi ojedinělá.



Obř. 24: Průběhy momentů a průhybů pro typická zatížení vetknuté rámové konstrukce [20]

3.1.2. Dvojklobové rámy

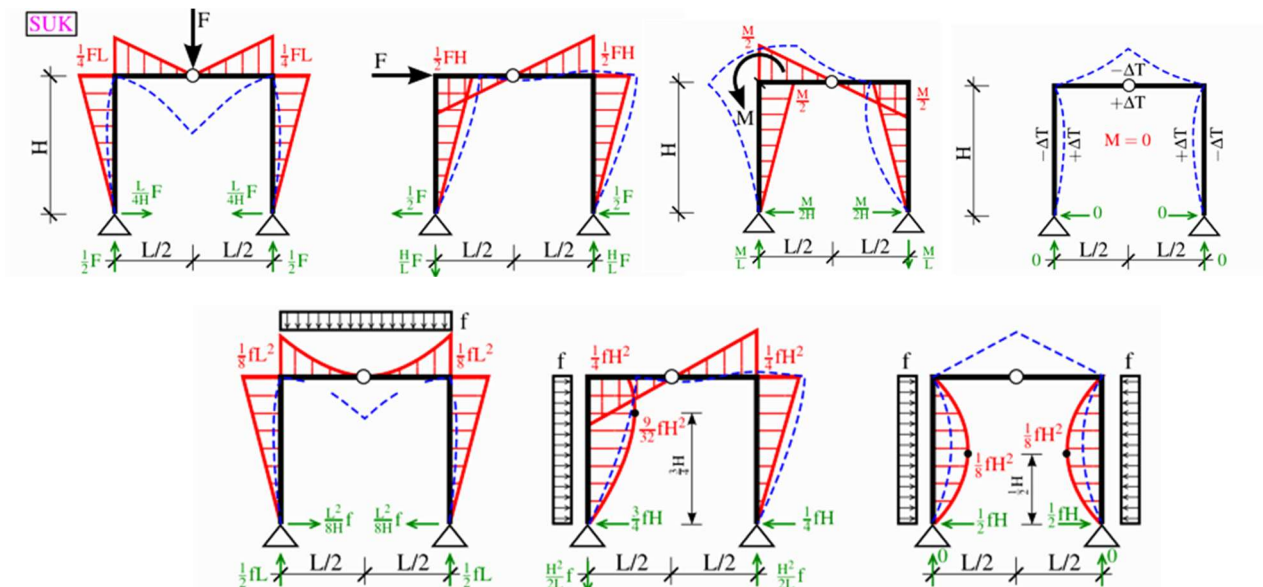
Stabilita dvojklobové rámové konstrukce je zajištěna dvěma neposuvnými klouby. Obdobně jako u vetknutého se jedná o tuhý nosný prvek s jedním stupněm statické neurčitosti. Konstrukce je stále náchylná k přetvořením v podporách a spojích, byť o něco méně než v předchozím případě. Pro obě tyto varianty rámy je typické složité řešení přepravy rozměrných prvků na stavenišť.



Obř. 25: Průběhy momentů a průhybů pro typická zatížení dvojklobové rámové konstrukce [20]

3.1.3. Trojkloubové rámy

Při zastřešení velkých prostor se jedná o nejvyužívanější variantu rámových konstrukcí, realizovaných ze dřeva. Díky možnosti rozdělení konstrukce v místě kloubového spoje je značně zjednodušena přeprava dílčích prvků a při prokluzu a deformacích v místě rámového rohu nedojde kromě částečné redistribuce momentů k větším změnám průběhů vnitřních sil. Jedná se ale o staticky určitou konstrukci a v případě vzniku plastického kloubu by došlo k celkovému kolapsu konstrukce.



Obr. 25: Průběhy momentů a průhybů pro typická zatížení trojkloubové rámové konstrukce [20]

3.2. Prostorové konstrukce

Prostorových objektů se nejlépe docílí opakováním rovinných konstrukcí. Nejčastěji podél linie nebo jejich rotací.

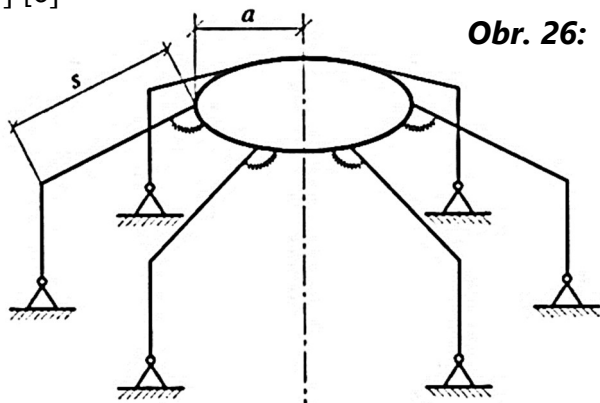
3.2.1. Halové konstrukce

Halové konstrukce, vzniklé opakováním rovinných rámu podél osy. Nezbytné je zajistit jejich spolupůsobení a celkovou tuhost konstrukce pomocí ztužidel. Základními principy jsou stabilizace pomocí účinků normálové síly (táhla, vzpěry příhradové konstrukce), smykové síly (smykové stěny a panely) a ohybového momentu (tuhé spoje a podpory). Díky tomu se všechny konstrukční prvky podílejí na celkové únosnosti konstrukce a brání tak progresivnímu kolapsu.

Nedílnou součástí proto musí být ztužidla, provedena nejčastěji diagonálními táhly a kolmými vzpěrami v rovině opláštění. Ztužením konstrukce se zvýší stabilita roznesením zatížení z více namáhaných vazeb (krajní podélně namáhaný rám). Tím se zvýší zatížení jednotlivých vazeb, zejména prvků, které přebírají toto zatížení do základů. [3]

3.2.2. Rotační rámové konstrukce

Tuhost a prostorové spolupůsobení rotačních ráků je zajištěno primárně tuhým tlačným prstencem ve vrcholu konstrukce a dodatečnými ztužujícími prvky. U rotačně symetrických konstrukcí se musí vyšetřovat dva způsoby vybočení. Kromě klasického vybočení v rovině polorámu je možným způsobem selhání stability také rotační vybočení prostorové konstrukce vlivem pootočení tlačného prstence okolo svislé osy. [4] [6]



Obr. 26: Statické schéma rotační rámové konstrukce [6]



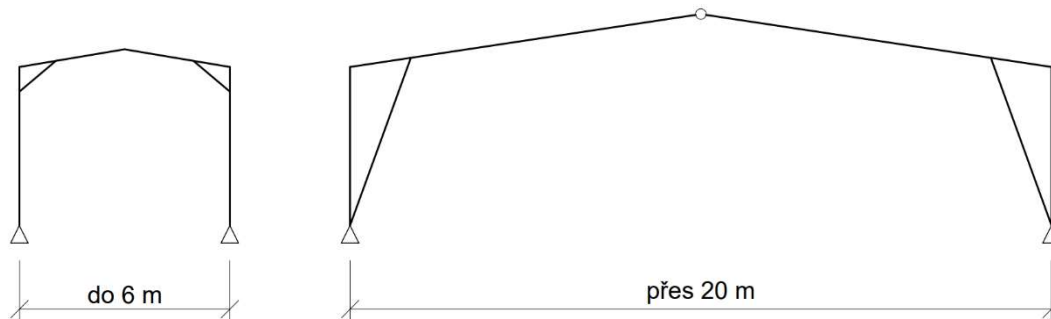
Obr. 27: Příklady realizací rotačních rámových konstrukcí: Výstaviště Jiaouzu, Čína (vlevo), ZOO Ohringen, Německo (vpravo) [14]



Obr. 28: Využití rotační konzolové konstrukce - dřevěný pavilon „Into the woods“ Švýcarské velvyslanectví, Kodaň, Dánsko [21]

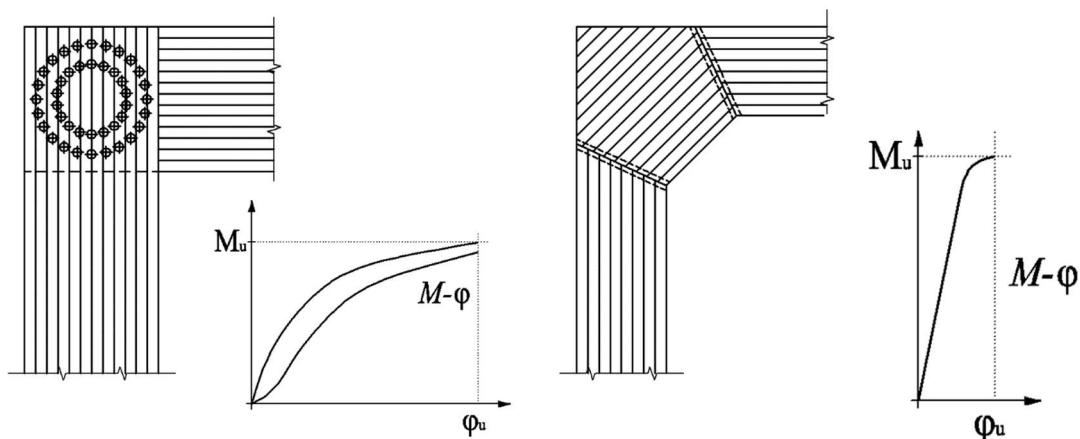
4. Typy rámových rohů

Tuhé spoje jsou klíčovým prvkem dřevěných halových konstrukcí. Vetknutí přičle umožňuje realizaci konstrukcí na velká rozpětí. V přičli tak lze redukovat momentové zatížení a tím uspořit výrazné množství materiálu.



Obr. 29: Schéma rámové konstrukce

U dřevěných konstrukcí však nikdy nelze počítat s absolutní tuhostí a hodnota poddajnosti podstatně ovlivňuje průběhy vnitřních sil. Zejména u ohybových momentů pak dochází k redistribuci o cca 10 – 20 %. Tuhost spoje je obvykle uváděna jako závislost $M-\varphi$, kdy je pootočení vyjádřeno v závislosti na velikosti momentového zatížení (Obr. 30).



Obr. 30: Příklad $M-\varphi$ závislosti u lepeného spoje [6]

Ve výpočtu celého rámu je uvažována modulem K_u pro výpočet únosnosti a K_{ser} pro výpočet přetvoření, jejichž hodnoty jsou uvedeny v ČSN EN 1995-1-1 [1]. Tyto moduly zohledňují velikost prokluzu jednoho spojovacího prostředku a jsou vyjádřeny:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \qquad K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser}$$

Kde ρ_m je průměrná hustota dřeva konstrukčních prvků:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}}$$

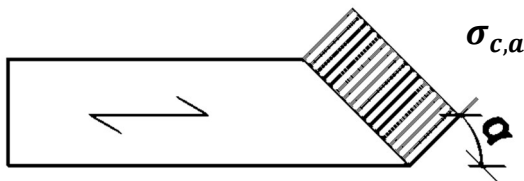
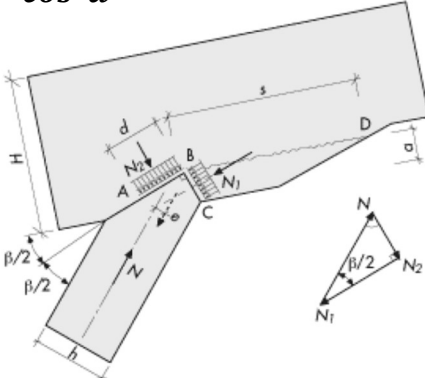
Průhyb konstrukce vlivem poddajnosti rámového rohu $w_{inst,1}$ je pak přičten k okamžitému průhybu $w_{inst,0}$. Návrh tuhého rohu je klíčovým problémem rámových konstrukcí. V dalších podkapitolách jsou uvedeny časté varianty provedení. [3] [8]

4.1. Rámový spoj pomocí tlačných a tažených prvků

Tento spoj je pravděpodobně nejstarším řešením rámových konstrukcí. Ve spoji dochází k zachycení momentového zatížení do soustavy dřevěných prvků, působících na rameni. Tyto konstrukce je možno provádět přímo na staveništi z menších konstrukčních prvků za pomoci jednoduchých tesařských, kolíkových spojů či spojů pomocí styčnickových desek a není třeba složitých technologií. Je tedy možné tyto spoje zpětně rozebrat. V přípoji jednotlivých prvků většinou dochází k působení osově síly pod úhlem a je třeba tyto prvky posoudit na tlak šikmo k vláknům dle ČSN EN 1995-1-1 (kapitola 6.2.2). Při malých úhlech je pevnost výrazně ovlivněna změnou úhlu, tj. malé odchylky ve sklonu vláken způsobují výraznou změnu pevnosti, především u pevnosti v tahu. Na druhé straně v oblasti pod úhlem $\alpha \cong 90^\circ$ je tahová i tlaková pevnost pouze málo ovlivněna. [1] [3] [4] [8]

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

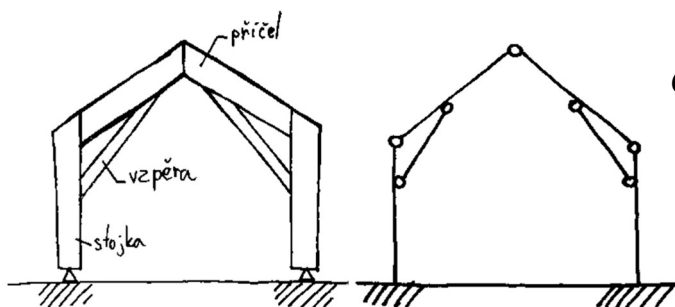
Obr. 31: Schéma působení a vzorec pro výpočet šikmého tlaku

4.1.1. Vzpěra v místě spoje stojky a příčle.

Zachycení momentu je v tomto případě provedeno osově působícím prvkem. Tím je propojena stojka a příčel. Tím je zamezeno vzájemnému natočení. Dochází k redukcí zatížení v poli příčle, na druhou stranu vznikají přidavná namáhání stojky. Na obr. 32 je tedy patrný rozdíl v dimenzi prvků. [1] [3] [11]



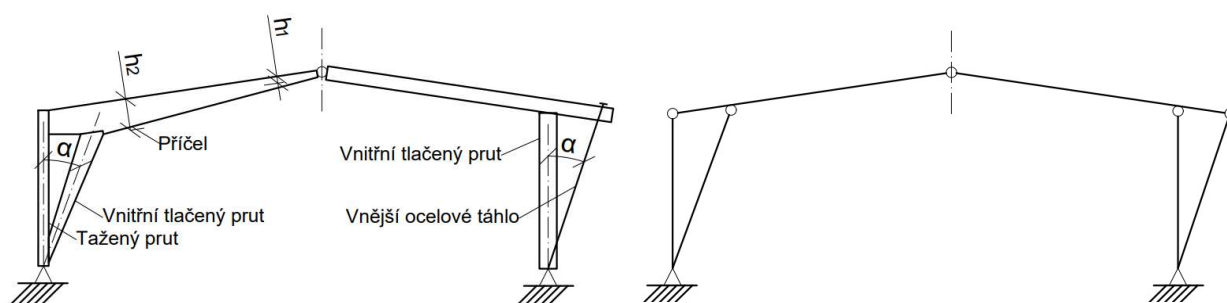
Obr. 32: Zastřešení lávky pro pěší, Longnan, Čína [14]



Obr. 32: Schéma konstrukce s použitím vzpěry

4.1.2. Řešení pomocí zdvojené stojky ve tvaru V

Přenos ohybového momentu je zajištěn tlačnou a taženou stojkou, která je připojena k příčli a svírá úhel v rozmezí $10^\circ - 20^\circ$. Na rozdíl od předchozího způsobu provedení nedochází k přídatnému silovému namáhání stojky. Při návrhu je ale třeba prověřit možné kombinace zatížení, aby nedošlo k tlakovému namáhání tažených prvků, obzvláště pak u variant se subtilním táhlem, by mohlo hrozit vybočení prvku vlivem vzpěru. Ve výpočtu je také třeba brát v úvahu vliv třídy prostředí. V případě, kdy je opláštěna stojka, ale dřevěné táhlo je stále vystaveno vnějším vlivům, se oba prvky nacházejí v jiné třídě prostředí. To má vliv nejen na jiné hodnoty vstupních součinitelů k_{mod} a k_{def} při výpočtu, ale je třeba také složitěji řešit tepelně technické detaily, riziko kondenzace a dodatečné namáhání prvku vlivem této vlhkosti.



Obr. 33: Schéma trojkloubové konstrukce s použitím V stojky



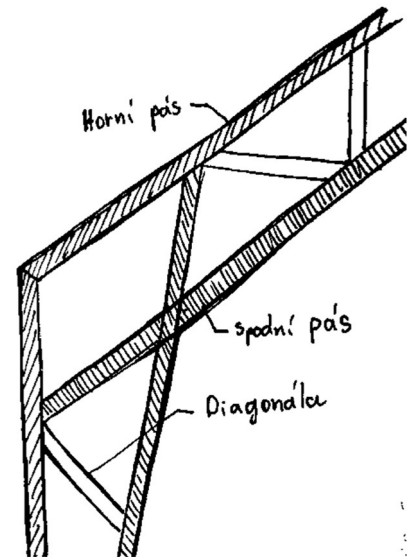
Obr. 34: Vlakové nádraží Jiaxing, Čína [14]

4.1.3. Příhradová konstrukce

Ve spoji dochází k zachycení momentového zatížení pomocí příhradové konstrukce do tlačeného a taženého pásu, působících na rameni a propojených diagonálami. Rámový roh tvořen protažením spodních pásů na kontakt s horními pásy. Příhradové konstrukce obecně poskytují velkou tvarovou variabilitu a různorodost konstrukcí. Styky samotných prutů mohou být prováděny styčnickovými deskami, kolíkovými prostředky či lepením. [3] [8]



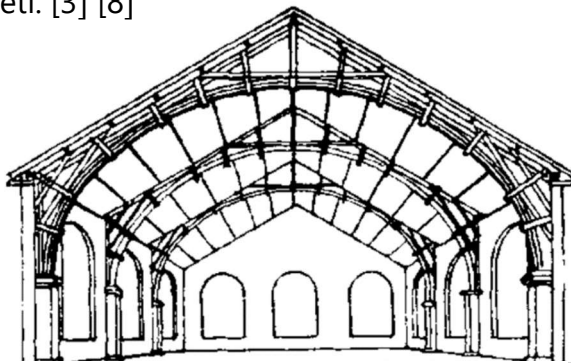
Obr. 35: Příhradová rámová konstrukce – Chata v Nizozemí [14]



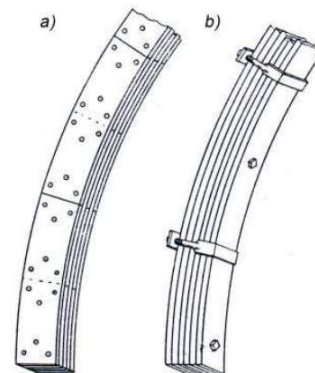
Obr. 36: Schéma řešení příhradového rámového rohu

4.2. Zakřivený rámový roh

Zakřivené rámové rohy využívají technologie lepeného lamelového dřeva a jeho ohýbatelnosti (viz. kap. 1.2 *Lepené lamelové dřevo*). Principem je přiblížení tvaru konstrukce průběhu tlakové čáry. Dříve byly zakřivené konstrukce prováděny pomocí tvarovaných skruží, sbíjených či sešroubovaných z dílčích prvků z deskového řeziva. Příkladem těchto konstrukcí jsou de L'Ormeho oblouky, které byly používány od 16. století. [3] [8]



Obr. 36: Schéma De L'Ormeho krov [15]



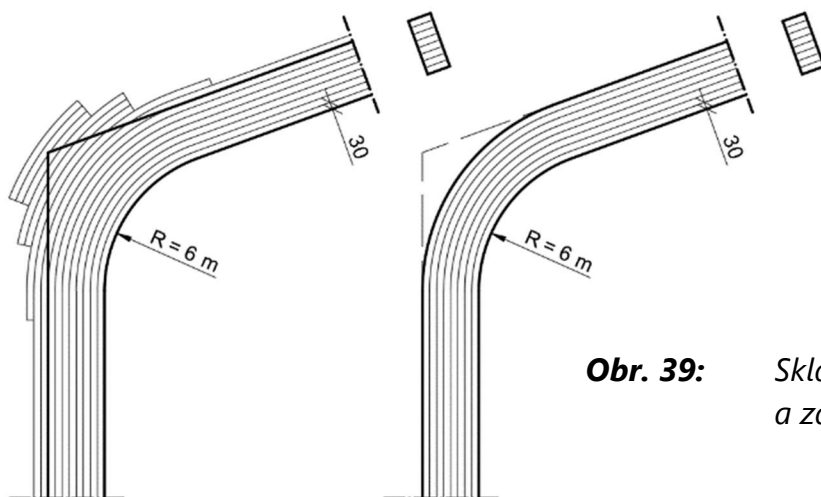
Obr. 37: a) De L'Ormeho, b) Emyho [15]

V dnešním stavitelství nepřichází v úvahu vytvářet zakřivené rámy v jednom kuse přímo na staveništi a je nutné je připravovat ve výrobnách. V případě nadměrné konstrukce, kterou by jinak nebylo možné přepravit na místo stavby, je možné vytvořit tuhý spoj pomocí příložných plechů. [4]



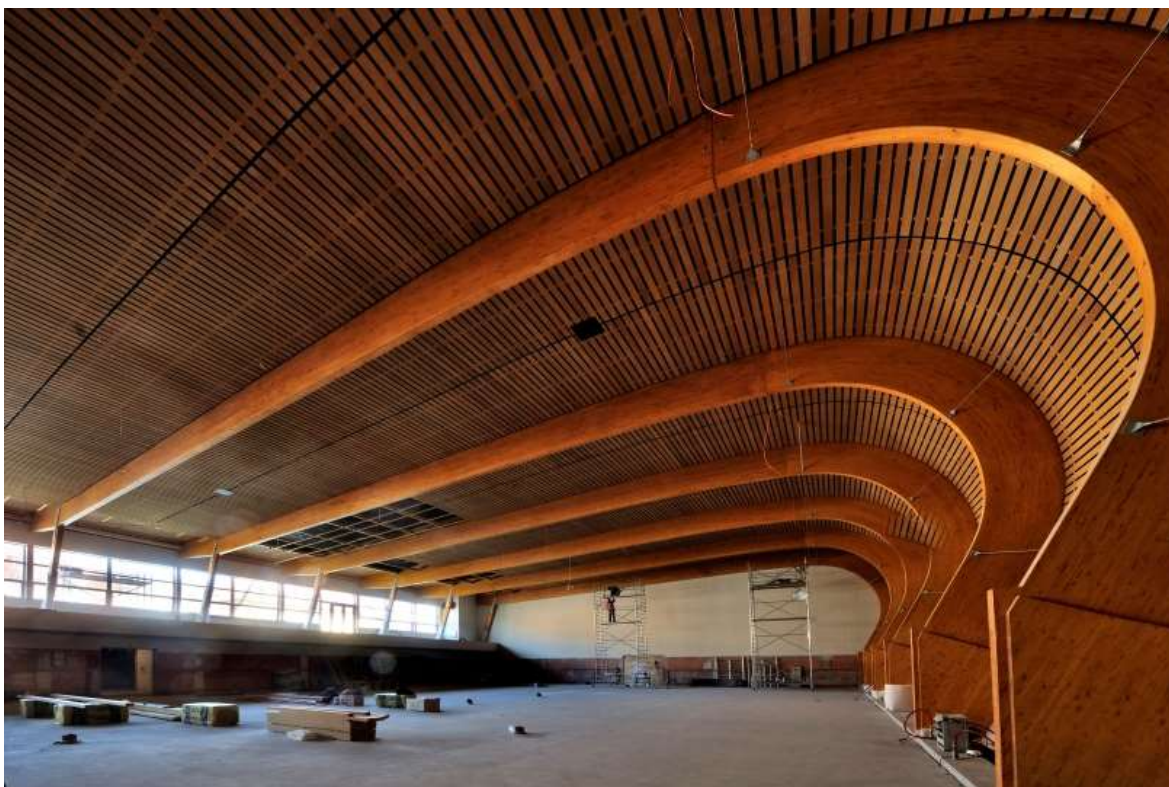
Obr. 38: Výstaviště Tacoma, USA [14]

Díky technologii lisování a možnosti frézování, lze obzvláště tímto typem konstrukce realizovat konstrukce takřka neomezených tvarů. Při návrhu těchto tuhých rohů platí, že poloměr zakřivení R je větší nebo roven dvousetnásobku tloušťky lamely (cca 30 mm), tedy $R \cong 6 \text{ m}$.



Obr. 39: Skladba nadvýšného sedlového a zakřiveného nosníku

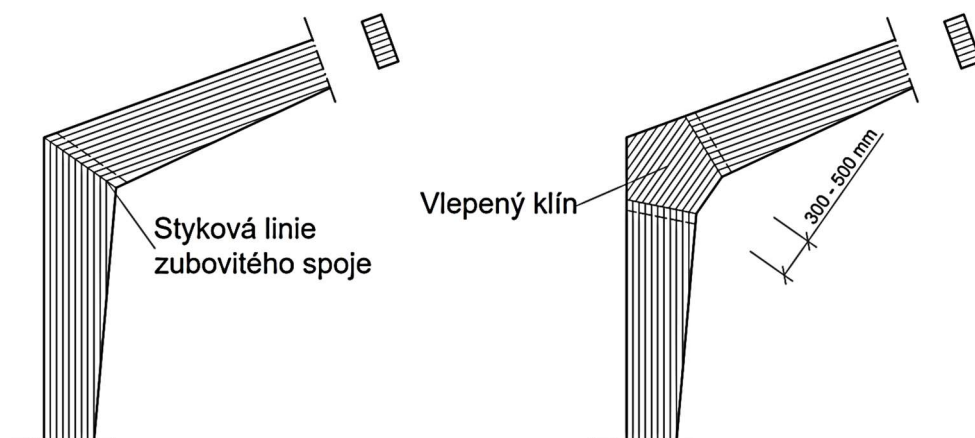
Při posuzování se vychází z postupů pro posuzování zakřivených nosníků (viz. Dřevěné konstrukce podle ČSN EN 1995-1-1 (kapitola 6.4.3 a 5.4.4) pro vlivy vynucených průhybů. V průřezích zakřivených nosníků se vyskytuje nelineární průběh normálového napětí a tah kolmo k vláknům. Konstrukce jsou také kvůli své délce a výšce průřezů náchylné na klopení a pro celkovou stabilitu je třeba tyto stabilitní problémy řešit pomocí přidavných prvků. [3] [4]



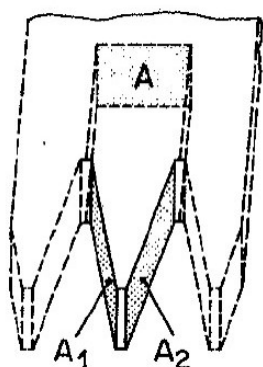
Obr. 40: Sportovní hala Chodov u Sokolova [22]

4.3. Lepený rámový roh

Provedení tohoto spoje je v tomto případě pomocí zubovitého spoje, který se vyfrézuje do šikmo seříznuté stojky a příčle. Díly se slepí buď napřímo, nebo je mezi ně vložen klín. Dle DIN 1052 je třeba navrhnout sklon seříznutí tak, aby byl svírán stejný úhel mezi stykovou linií a směrem vláken u příčle i stojky. V případě normálového napětí se má účinná plocha redukovat o 20 %, při působení kladného momentu nesmí tah kolmo k vláknům překročit 20 % únosnosti a z důvodu možných konstrukčních vad dřeva je vždy uvažována o třídu nižší pevnost dřeva. Přípoj však lze považovat za dostatečně tuhý. [3] [8]



Obr. 41: Schéma lepeného rámového rohu



$$A_L = A_1 + A_2$$

$$\frac{A_L}{A} \geq 6$$

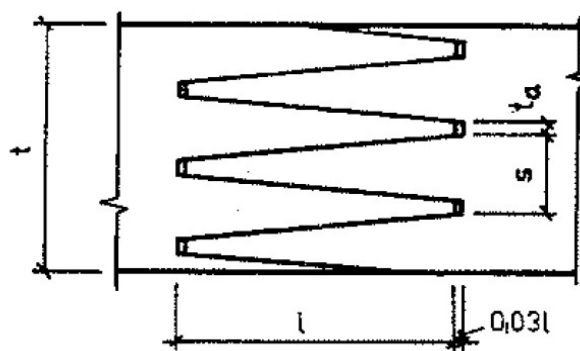
Princip lepeného spoje spočívá v nahrazení plochy původního prvku lepenou plochou. Přičemž poměr nově vzniklé lepené a původní plochy by měl být větší nebo roven šesti. [8]

Obr. 42: Schéma lepených ploch [8]

Délky zubů se provádějí ve 3 velikostech:

- mini (L = 7,5 mm)
- midi (L = 22 mm)
- maxi (L = 50 – 60 mm).

Pro účely rámových rohů se většinou používá velikost 50 - 60 mm. Pevnost spoje závisí jak na délce zubů, tak na jejich sklonu. Menší sklon rovněž znamená větší oslabení. [3] [8]



Obr. 43: Schéma zubovitého spoje [8]

Z důvodu technologické náročnosti výroby je většinou nemožné realizovat spoj na staveništi a musí se proto řešit následná doprava z dílny. Pro správné působení, trvanlivost spoje a dostatečnou tuhost je třeba používat kvalitní lepidla a dodržovat technologickou kázeň. [4]



Obr. 44: Příklad realizace – stodola Weiteveen, Nizozemsko [14]



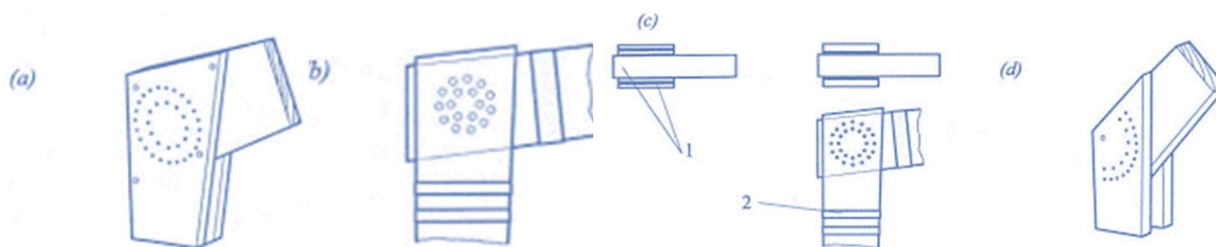
Obr. 45: Příklad realizace – stodola Weitevee, Nizozemsko [14]

4.4. Svorníkový rámový roh

Asi nejčastější variantou provedení rámového rohu je sepnutí pomocí svorníků. Tento typ umožňuje montáž na staveništi a tím je oproti lepeným a zakřiveným ráům podstatně usnadněna přeprava konstrukce na stavbu. Konstrukci je díky tomu možno na konci životnosti rozebrat.

Do nosných dřevěných prvků jsou předvrtány otvory, kterými se následně provlečou jednotlivé svorníky a následně se postupně dotahují, dokud konstrukce nenabyde dostatečné tuhosti. Spoj lze realizovat jako jednostřížný i dvojtřížný, kdy je obvykle spojována jednodílná příčel s dvojdílnou stojkou.

Spojovací prostředky je možno uspořádat v jakémkoliv obrazci. Nejvýhodnější je však uspořádání kruhovitě a pravouhlé. Z důvodu náchylnosti k rozštěpení se však u spojů dřevo-dřevo volí kruhovitě uspořádání, kdy každý prvek tlačí na vlákna pod jiným úhlem a nevzniká tak větší koncentrace napětí na tah kolmo k vláknům, jako je to v případě uspořádání pravouhlého. Pro omezení rizika rozštěpení je třeba také dodržovat předepsané odstupové vzdálenosti od okrajů konstrukce i mezi jednotlivými svorníky navzájem (viz. Obr. 14). Tyto vlastnosti lze také zlepšit využitím sekundárních prvků zastřešení, užitím kolíků, místo svorníků nebo také úpravami na obr. 46.



Obr. 46: a) Typický rámový roh s kolíky
 b) Zalisované hmoždíky
 c) Zesílení prvků (1 – vlepené pruty, 2 – přilepené desky)
 d) Speciální uspořádání
 [3]

Svorníkový roh je nejen nejpoužívanějším, ale pravděpodobně také nejpoddajnějším řešením rámového rohu. Obzvláště zde je třeba počítat s počátečním prokluzem a dotvarováním spoje s následným ovlivněním působení vnitřních sil.

Při tomto prokluzu dochází vlivem narůstajícího zatížení k lineárnímu nárůstu deformace až do té doby, než spojovací prostředek nezačne kontinuálně tlačit na otláčovanou plochu. V případě svorníkového rámového rohu je tedy nutno brát v potaz vzájemné pootočení příčle a stojky.

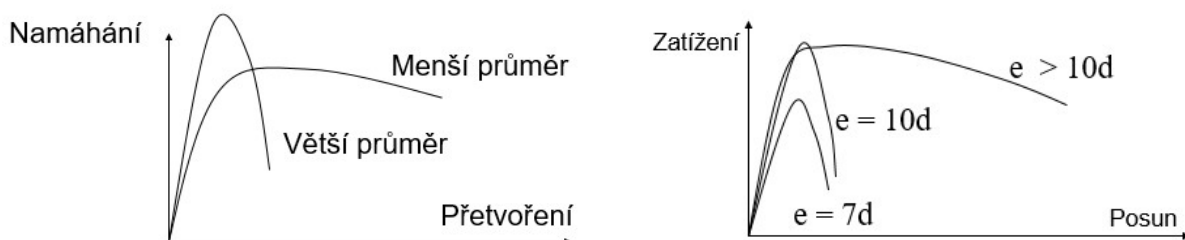
Z důvodu těchto prokluzů se spoj je žádoucí navrhovat tento spoj v trojkloubových systémech, aby vlivem dotvarování (např. prokluzu nebo poklesu podpor) nedošlo ke vzniku druhotných momentů na konstrukci.

Tento problém je pak o to složitější u kruhového uspořádání svorníků, kdy jsou jednotlivé spojovací prostředky namáhány pod různými úhly k vláknům a k namáhání dřeva v otláčení tak dochází v různých směrech. Z toho následně vychází rozdílné moduly posunutí (K_{ser} a K_u viz. kap. 4. Typy rámových rohů). Tyto směry jsou do výpočtu vneseny při výpočtu dílčí složky síly od momentového zatížení F_M jako modul posunutí ve směru síly K_{α} .

$$F_M = \frac{K_{\alpha_u} \cdot r_i}{K_{r,u,d}} \cdot M_{u,d}$$

Mezní stav únosnosti se stanoví dle ČSN EN 1995-1-1. Celková únosnost rámu je dána pevností stěny otvoru v otláčení, která závisí na průměru a vzdálenosti spojovacích prostředků, hustotě dřevěných prvků a na úhlu, pod kterým síla působí na směr vláken.

Na duktilitu (=kapacita plastické deformace), spoje má vliv také rozmístění a průměr spojovacích prostředků z následujících grafů (Obr. 47) je patrné, že čím je větší průměr svorníku, tím je spoj tužší a únosnější, ale na druhou stranu mnohem křehčí. Na obr. 47 lze pozorovat, že s rostoucí vzdáleností spojovacího prostředku od okraje nijak výrazně neroste únosnost, ale jeho duktilita ano. [3] [5] [8] [11]



Obr. 47: Vliv průměru svorníků a odstupových vzdáleností na duktilitu [8]



Obr. 48: *Jízdárna Paceřice [23]*



Obr. 49: *Dům v Les Genettes, Francie [14]*

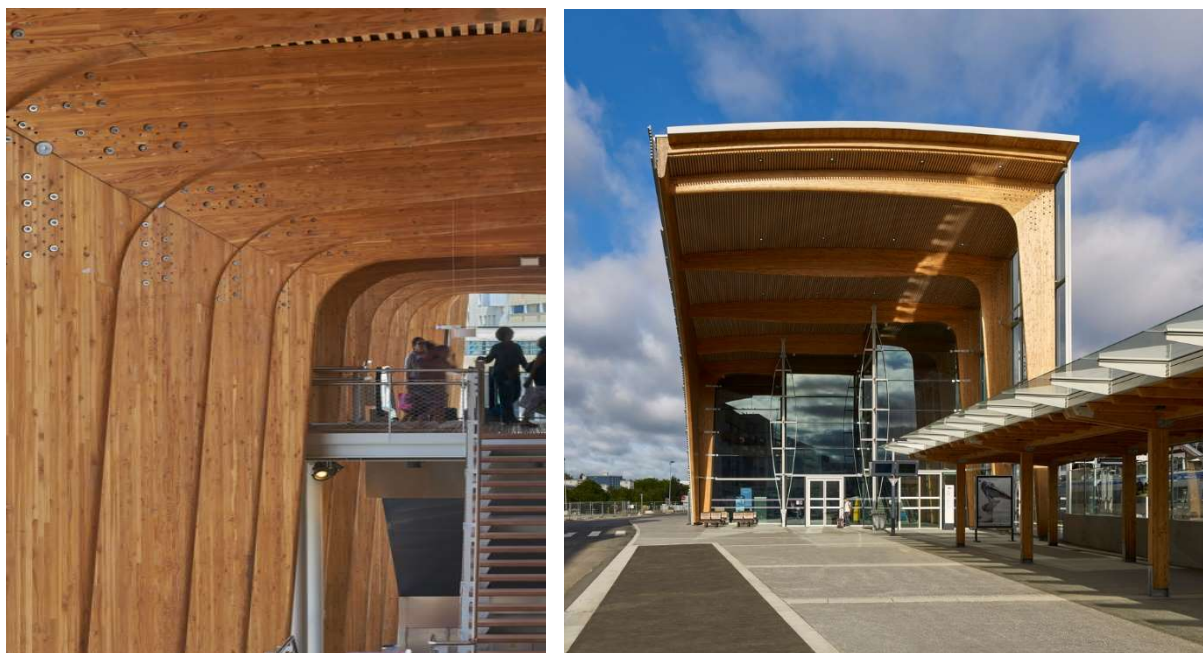
4.5. Svorníkový roh s ocelovými plechy

Obdobou svorníkového rohu je také roh s využitím ocelového plechu. Hlavním rozdílem je to, že ohybový moment mezi příclí a stojkou je přenášen výhradně ocelovým plechem. Plech o tloušťce zhruba 20 - 40 mm se vkládá do zařezaných drážek v čelech prvků. Pro přenos vnitřních sil (zejména ohybových momentů) a dosažení dostatečné tuhosti je potřeba zajistit dostatečné spolupůsobení ocelového plechu s dřevěnými prvky, tedy funkci spoje ocel-dřevo. Spoj se provede pomocí svorník do předvrtaných děr, případně navařených trnů.

Obdobně jako u čistě svorníkových rohů je i zde výhodou možnost předvýroby a jednodušší přepravy dílčích komponentů, které se smontují na stavbě. V obou případech je ovšem potřeba velké množství spojovacích prostředků. Tím pádem také rostou náklady těchto spojů.

Oproti dřevěným spojům se svorníky, v tomto případě rozmístí u většinou pravouhle a působí tak pod téměř stejnými úhly ke směru vláken. Kromě dotvarování však u spojů s ocelovými plechy přibývá problém s bobtnáním a sesycháním dřevěných prvků vlivem vlhkosti. Tuhé desky totiž zabraňují volnému bobtnání a sesychání a vznikají tak přídavná napětí v tahu kolmo na vlákna, která přispívají ke vzniku trhlin v nosnících, zejména pak ve vysokých prvcích. Kromě toho mohou být konce dřevěných prvků navíc namáhány samotnou roztažností ocelových plechů vlivem kolísání teplot. Nejčastěji se tomuto riziku předchází umístěním dvou menších ocelových plechů.

Dalším úskalím může být reakce a chování spoje při požáru. Ocel při vysokých teplotách poměrně rychle zplastizuje a je tedy nutné ji před účinky požáru chránit, a to nejčastěji umístěním styčnickových plechů dovnitř dřevěných prvků a zamezit tak přímému kontaktu s ohněm. Obvykle se tak tyto spoje provedou jako dvojstřížné. [3] [5] [8] [10]



Obr. 50: Vlakové nádraží Lorient, Francie [14]

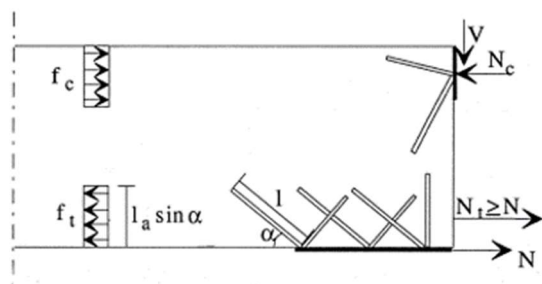
4.6. Rámové rohy s vlepovanými tyčemi

Také v tomto případě jsou ohybové momenty přenášeny pomocí tažených a tlačných elementů, působících na rameni. V tomto případě jsou však tyto elementy vlepeny do předvrtaných otvorů uvnitř průřezu.

Pro tento účel jsou primárně používány ocelové tyče, které je následně možno spojit sešroubováním nebo na ně navařit ocelové styčné desky. Pro lepení se používají lepidla epoxidová a resorcinová.

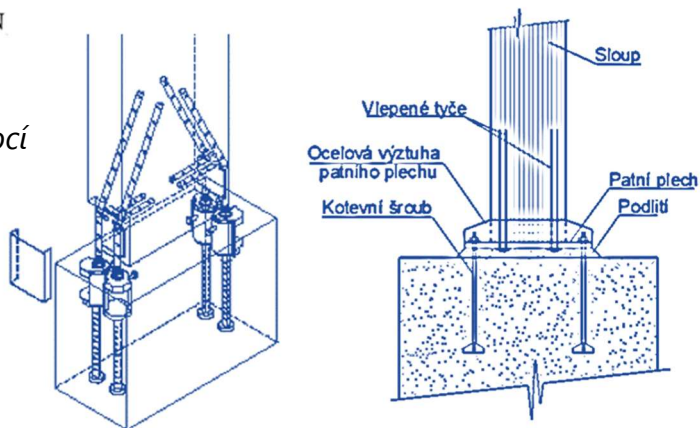
Kvůli obtížnému docílení adheze se zpravidla používají závitové tyče $\varnothing 12 - 24$ mm. Lepení probíhá buď injektáží lepidla, nebo se tyče zašroubují. V případě injektáže je předvrtán otvor 1 mm větší, než je vnější průměr tyče a ve druhém případě je prut zašroubován do předvrtaného otvoru, vyplněného lepidlem, o menším průměru. Aby bylo zajištěno správné rozdělení lepidla, prut je vybaven podélnou drážkou.

Tyče lze vlepovat v různých vzdálenostech po výšce průřezu a tím získat velké rameno vnitřních sil (Obr. 51) a pod různým sklonem. Čím větší je však úhel mezi sklonem vláken a tyčí, tím více je zamezeno sesychání a dochází k většímu tahovému namáhání kolmo k vláknům. Faktem ale zůstává, že únosnost prutů vlepovaných kolmo k vláknům je obecně podstatně vyšší než rovnoběžně s vlákny.

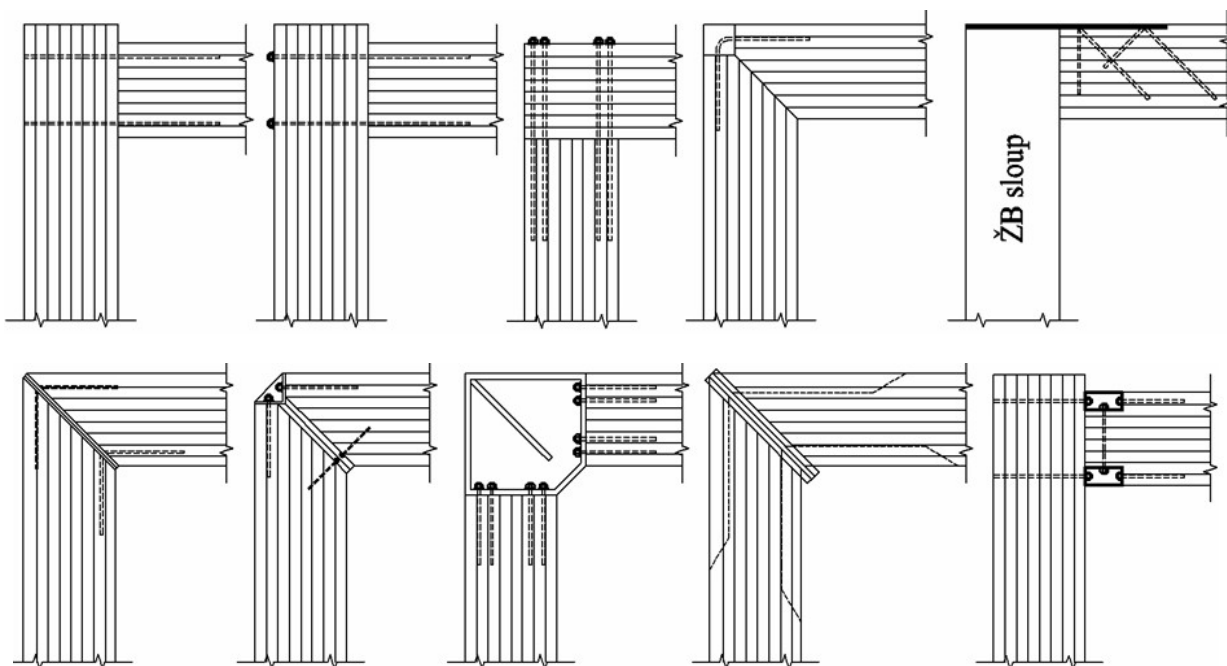


Obr. 52: Schéma vetknutí do betonových prvků pomocí vlepovaných tyčí [8]

Obr. 51: Princip zachycení ohybového momentu [8]



Spoj se vyznačuje velkou tuhostí, umožňuje přenos velkých sil osamělých sil a navíc vykazuje dobrou požární odolnost. U lepených prutů, namáhaných na stříh, je vlivem lepidla asi o 20% zvýšena pevnost dřeva v otláčení v místě otvoru. Tato technologie navíc umožňuje tuhé napojení na již stávající konstrukce, zejména pak pro připoje k betonovým konstrukcím a k realizaci vetknutých patek. [1] [3] [8]



Obr. 53: Způsoby aplikace vlepovaných tyčí [8]

Při návrhu těchto konstrukcí je možné vycházet z normy ČSN EN 1995-1-1.

4.7. Modifikované rámy

Použití rámových rohů není omezeno jen pro velkorozponové halové konstrukce, ale je aplikováno také u menších objektů. Umožňuje totiž vynesení konstrukce zastřešení objektu, aniž by došlo k výraznému omezení dispozice podkroví. Tyto konstrukce jsou jakousi levnější a poddajnější alternativou k výztužným ocelovým plechům. Narozdíl od nich jsou však umístěny vně prvků a to přišroubováním pomocí vrtů, přibitím hřebíky nebo přilepením. Nejjednodušší je použití běžných deskových materiálů jako jsou OSB desky, lepené překližkové přílohy a desky s prolisovanými trny gang-nail.

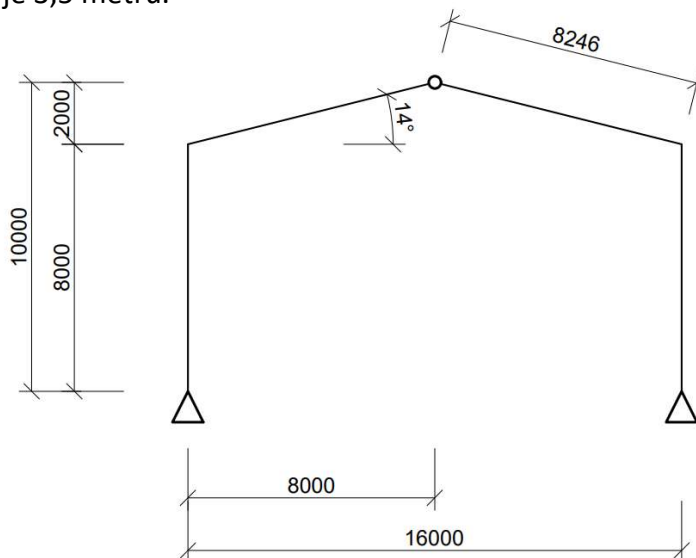


Obr. 54: Loděnice Auckland, Nový Zéland [14] **Obr. 55:** Příklad provedení [24]

5. Příklad výpočtu rámového rohu

5.1. Geometrie a zatížení rámové konstrukce

Výpočet únosnosti rámového rohu je proveden pro referenční trojkloubovou rámovou konstrukci na rozpětí 16 metrů, výškou hřebene 10 metrů a sklonem příčle 14° (25%). Vzdálenost vazeb je 3,5 metrů.



Obr. 56: Schéma řešené rámové konstrukce

5.2. Výpočet vnitřních sil v místě rámového rohu

Vnitřní síly jsou vypočteny pomocí SW SCIA Engineer 21.1.5019. Výpočet zatížení není předmětem této práce, a proto bylo odhadnuto na základě empirických zkušeností. Uvažované hodnoty liniového zatížení jsou:

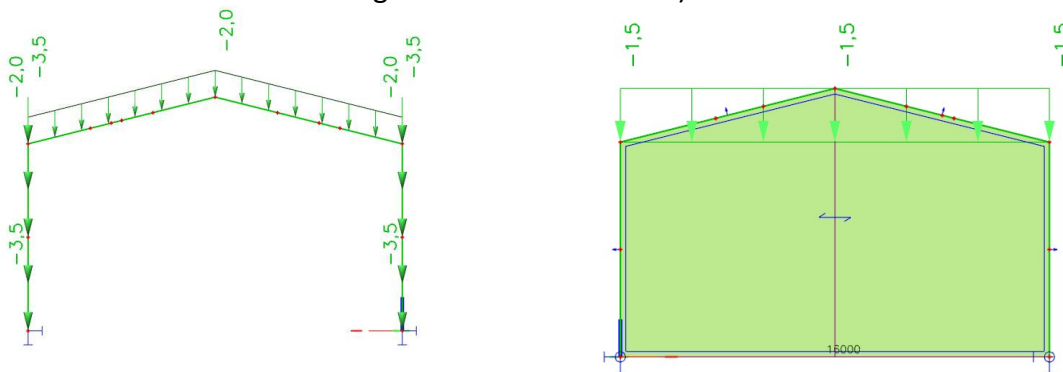
Stálé: - Vlastní tíha (uvažováno programem SCIA Engineer)

- Ostatní stálé $g_{k, lin, p} = 2,00 \text{ Kn/m}$

$g_{k, lin, s} = 3,50 \text{ Kn/m}$

Proměnné: - Sníh $s_k = 1,5 \text{ kN/m}$

- Vítr (vygenerován pro celou konstrukci programem SCIA Engineer dle ČSN EN 1991)



Obr. 57: Zatížení rámové konstrukce

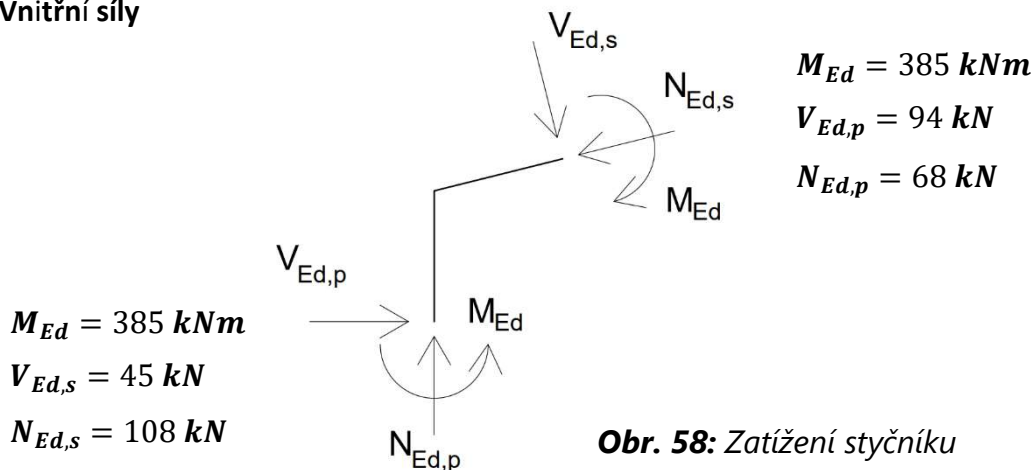
5.3. Návrh přípoje

Vzhledem k tomu, že se jedná o výsek konstrukce, u kterého je řešena pouze únosnost, bylo stanoveno, že bude proveden výpočet pouze pro MSÚ.

5.3.1. Návrh svorníků

5.3.1.1. Vstupní hodnoty

– Vnitřní síly



Obr. 58: Zatížení styčnicku

– Charakteristiky lepeného lamelového dřeva GL24h

Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k} = 24,0 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,q,k} = 19,2 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu kolmo k vláknům	$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ MPa}$
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k} = 24,0 \text{ MPa}$
Pevnost v tlaku kolmo k vláknům	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa}$
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k} = 3,5 \text{ MPa}$

Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vl. $E_{0,g,mean} = 11,5 \text{ GPa}$

5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vl. $E_{0,g,0,05} = 9,6 \text{ GPa}$

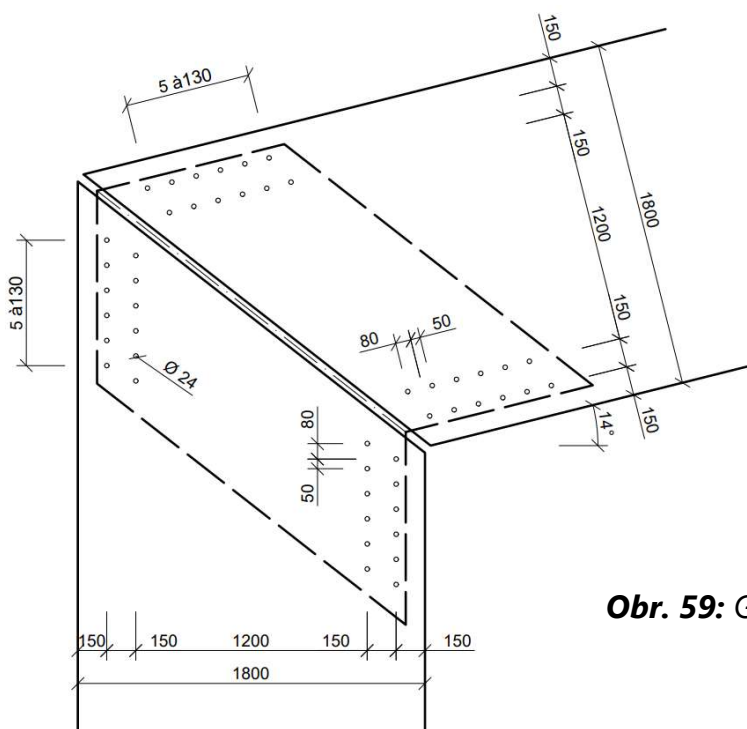
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vl. $E_{90,mean} = 0,3 \text{ GPa}$

Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku $G_{mean} = 0,65 \text{ GPa}$

Materiálový součinitel: $\gamma_M = 1,25$

Modifikační součinitel $k_{mod} = 0,8$

5.3.1.2. Geometrie spoje



Počet svorníků: 48 ks

Obr. 59: Geometrie styčnicku

5.3.1.3. Zatížení jednoho svorníku

Výpočet zatěžovací smykové síly, působící na jeden svorník je proveden zvlášť pro každou složku vnitřních sil. Výpočet je proveden pro rámovou příčli i stojku.

a) Složka od ohybového momentu:

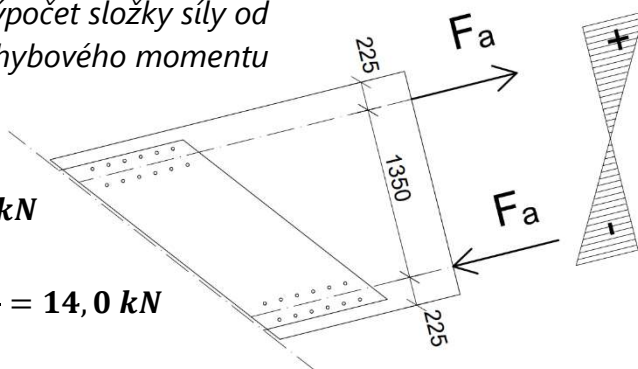
Pro výpočet síly od ohybového momentu byl použit předpoklad, že moment je zachycen dvojicí sil, působícími na rameni. Bylo určeno, že tato výslednice sil prochází těžištěm dílčích řad spojovacích prostředků.

Obr. 60: Výpočet složky síly od ohybového momentu

$$M_{ed} = r \cdot F_a$$

$$\Rightarrow F_a = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{385}{1,35} = 285,2 \text{ kN}$$

$$F_M = \frac{F_a}{0,85 \cdot (\Sigma n)} = \frac{285,2}{0,85 \cdot 2 \cdot 12} = 14,0 \text{ kN}$$



b) Složka od posouvající síly

$$F_{V,s} = \frac{V_{Ed,s}}{0,85 \cdot \Sigma n} = \frac{45}{0,85 \cdot 24} = 2,2 \text{ kN}$$

$$F_{V,p} = \frac{V_{Ed,p}}{0,85 \cdot \Sigma n} = \frac{94}{0,85 \cdot 24} = 4,6 \text{ kN}$$

c) Složka od normálové síly

$$F_{N,s} = \frac{N_{Ed,s}}{0,85 \cdot \Sigma n} = \frac{108}{0,85 \cdot 24} = 5,3 \text{ kN}$$

$$F_{N,p} = \frac{N_{Ed,p}}{0,85 \cdot \Sigma n} = \frac{68}{0,85 \cdot 24} = 3,3 \text{ kN}$$

d) Celkové zatížení svorníku v rámové stojce

$$F_{D,s} = \sqrt{(F_{V,s})^2 + (F_{N,s} + F_M)^2} = \sqrt{(2,2)^2 + (5,3 + 14,0)^2} = 19,4 \text{ kN}$$

e) Celkové zatížení svorníku v rámové příčli

$$F_{D,p} = \sqrt{(F_{V,p})^2 + (F_{N,p} + F_M)^2} = \sqrt{(4,6)^2 + (3,3 + 14,0)^2} = 18,5 \text{ kN}$$

5.3.1.4. Návrh svorníku

Návrh: 43 x ocelový svorník Ø 22 mm pevnostní třídy 4.6

$$f_{u,k} = 400 \text{ MPa}$$

5.3.1.5. Posudek únosnosti

Výpočet únosnosti je proveden dle Johansenových vzorců v ČSN EN 1995-1-1. Jedná se o spoj dvojitřžný a není tedy nutné rozlišovat mezi výpočtem tenké a tlusté desky.

- Charakteristická pevnost v otlacení dřeva rovnoběžně s vlákny:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 22) \cdot 380 = 24,3 \text{ MPa}$$

- Charakteristický plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 400 \cdot 22^{2,6} = 371\,091 \text{ Nmm}$$

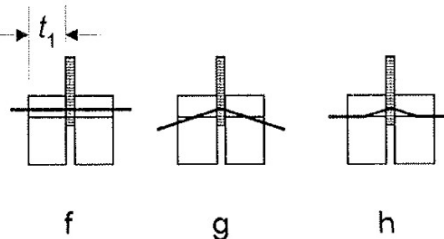
- Charakteristická únosnost pro jede stříh jednoho svorníku $F_{v,r,k}$:

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 24,3 \cdot 100 \cdot 22 = 53,5 \text{ kN} \\ 2,3 \cdot \sqrt{371\,091 \cdot 24,3 \cdot 22} + 0 = 32,4 \text{ kN} \\ = 24,3 \cdot 100 \cdot 22 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 371\,091}{24,3 \cdot 100^2 \cdot 22}} - 1 \right] + 0 = 80,7 \text{ kN} \end{array} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = 32,4 \text{ kN}$$

Z výpočtu vyplývá, že kritický způsob porušení je vytvoření plastického kloubu svorníku místě ocelového plechu (**g**).



Obr. 61: Mechanizmy porušení

- Návrhová únosnost svorníku ve stříhu:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{32,4}{1,25} = 20,7 \text{ kN}$$

- Posudek:

$$\frac{F_{D,s}}{2 \cdot F_{v,Rd}} = \frac{19,4}{2 \cdot 20,7} = 0,47 < 1,0$$

– Vyhovuje

- Maximální smykové napětí ve dřevě:

$$\tau_V = 1,5 \cdot \frac{V_{V,D,s}}{b \cdot h} = 1,5 \cdot \frac{94}{0,22 \cdot 1,8} = 356 \text{ kPa}$$

- Návrhová smyková únosnost dřeva:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{3,5}{1,25} = 2,24 \text{ MPa}$$

- Posudek dřevěného prvku na smyk:

$$\frac{\tau_V}{f_{v,d}} = \frac{0,356}{2,24} = 0,44 \leq 1,0$$

– Vyhovuje

5.3.2. Návrh styčnickové desky

Ocelová styčnicková deska musí přenášet působící vnitřní síly mezi dřevěnými prvky. Provede se tedy samostatný posudek v kritickém řezu desky (řez, oslabený otvory). Při návrhu se vychází z minimálních odstupových vzdáleností spojovacích prvků. Byť se navrhuje ocelový prvek, bude použit pro spoj dřevěných prvků, a tak je třeba vycházet z tabulky na obr. 14.

- **Minimální rozteče:**
 - Mezi kolíky: **p = 130 mm**
 - Od konce: **e = 160 mm**

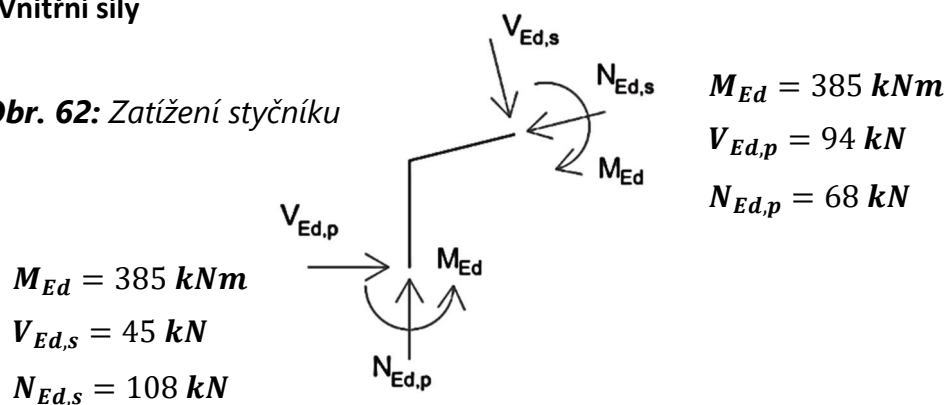
Pro účely této práce bude posudek desky proveden pružně a pro zjednodušení bez výpočtu třídy průřezu.

5.3.3. Vstupní údaje

5.3.3.1. Návrhové síly

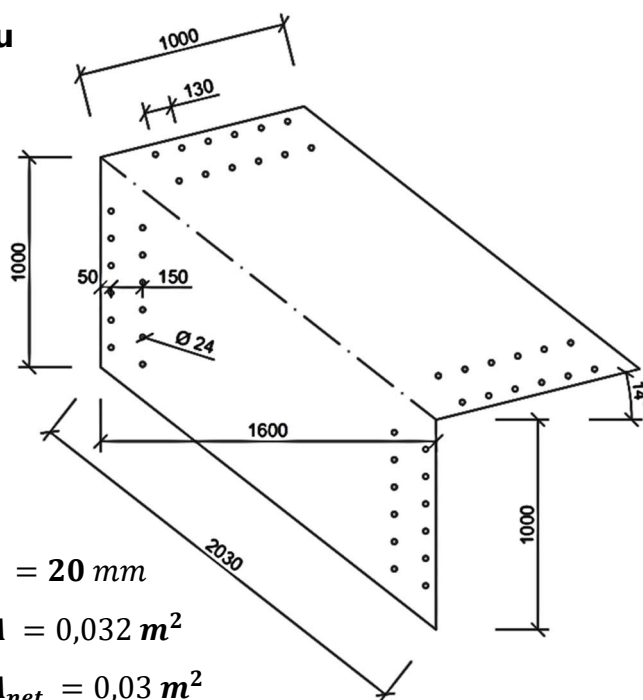
- Vnitřní síly

Obr. 62: Zatížení styčnicku



5.3.3.2. Návrh plechu

Obr. 63: Rozměry ocelového plechu



- Použitá ocel: S235

Tloušťka plechu

$$t = 20 \text{ mm}$$

Plocha neoslabeného průřezu

$$A = 0,032 \text{ m}^2$$

Plocha oslabeného průřezu

$$A_{net} = 0,03 \text{ m}^2$$

Mez kluzu

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti

$$f_u = 360 \text{ MPa}$$

Součinitel spolehlivosti:

$$\gamma_{M0} = 1,0; \gamma_{M2} = 1,25$$

5.3.3.3. Posouzení MSÚ

– Klasifikace průřezu

$$S235 \rightarrow \varepsilon = 1,00$$

$$\frac{c}{t} = \frac{1600}{20} = 80 < 83 = 83 \cdot \varepsilon$$

2. třída průřezu - Elastický výpočet

**Ve výpočtu není uvažováno vliv klopení a vzpěru, plech je stabilizován dřevěnými prvky.*

A) Tlak-tlak

– Maximální tlaková síla:

$$N_{Ed,s} = 108 \text{ kN}$$

– Návrhová únosnost neoslabeného průřezu:

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,032 \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 7\,520 \text{ kN}$$

– Návrhová únosnost oslabeného průřezu:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 0,03 \cdot 360 \cdot 10^3}{1,25} = 7\,776 \text{ kN}$$

– Posudek:

$$N_{t,Rd} = \max(N_{t,Rd}; N_{u,Rd}) = 7\,776 \text{ kN} \gg 108 \text{ kN} = N_{Ed,s}$$

– Vyhovuje

B) Ohyb

– Zatěžovací moment:

$$M_{Ed} = 385 \text{ kNm}$$

– Návrhová únosnost v ohybu uprostřed desky:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,00853 \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 2\,004,6 \text{ kNm}$$

- Elastický průřezový modul:

$$W_{el} = \frac{t \cdot h_x^2}{6} = \frac{0,02 \cdot 2,03^2}{6} = 0,00853 \text{ m}^3$$

- Ohybový moment v diagonále:

- Maximální posouvající síla: $V_{Ed} = 94 \text{ kN}$

- Rameno síly (odečteno z geometrie): $e = 0,97 \text{ m}$

$$M_{x,Ed} = M_{Ed} + V_{Ed} \cdot e = 385 + 94 \cdot 0,97 = 476,2 \text{ kNm}$$

– Návrhová únosnost v ohybu oslabeného průřezu desky:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{0,1245 \cdot 235 \cdot 10^3}{1,25} = 2\,340,6 \text{ kNm}$$

- Elastický průřezový modul oslabeného průřezu:

$$W_{el,min} = \frac{I_{net}}{\frac{h_x}{2}} = \frac{0,01245}{\frac{2,03}{2}} = 0,0123 \text{ m}^3$$

- Moment setrvačnosti oslabeného průřezu (vypočteno pomocí SW):

$$I_{net} = 0,01245 \text{ m}^4$$

- Posudek:

$$M_{x,Ed} = 385 \text{ kNm} \ll 2\,004,6 \text{ kNm} = M_{Rd}$$

– Vyhovuje

$$M_{Ed} = 476,2 \text{ kNm} \ll 2\,340,6 \text{ kNm} = M_{c,Rd}$$

– Vyhovuje

C) Smyk

- Maximální smyková síla

$$V_{Ed} = 94 \text{ kN}$$

- Návrhová únosnost ve smyku:

$$V_{c,Rd} = \frac{\frac{A_v f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,03 \cdot 235 \cdot 10^3 / \sqrt{3}}{1,0} = 4\,070,3 \text{ kN}$$

- Účinná plocha průřezu:

$$A_v = (h - 4 \cdot d) \cdot t = (1,6 - 4 \cdot 0,024) \cdot 0,02 = 0,03 \text{ m}^2$$

- Posudek:

$$V_{c,Rd} = 4\,070,3 \text{ kN} > 94 \text{ kN} = V_{Ed}$$

– Vyhovuje

Závěr

Navržená ocelová deska o tloušťce $t = 20 \text{ mm}$ s velkou rezervou vyhoví.

5.4. Návrh a posudek dřevěných prvků pro 1. třídu provozu

Po konzultaci s vedoucím budou prvky navrženy se zohledněním ztráty stability vlivem klopení a vzpěru. Ve skutečnosti však bude proti vybočení zajištěn ztužidly a konstrukcí střešního a obvodového pláště.

5.4.1. Příčel

- Návrhové vnitřní síly:

$$M_{Ed} = 385 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,p} = 94 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,p} = 68 \text{ kN}$$

- Rozměry příčle:

$$h = 1800 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

- Průřezové charakteristiky:

$$A = h \cdot b = 1,8 \cdot 0,22 = 0,396 \text{ m}^2$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,22 \cdot 1,8^2}{6} = 0,119 \text{ m}^3$$

- Posouzení ohybu v místě rámového rohu:

- Napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{385 \cdot 10^{-3}}{0,119} = 3,24 \text{ MPa}$$

- Návrhová pevnost v ohybu:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

- Posouzení MSÚ:

$$\sigma_{m,d} = 3,24 \text{ MPa} < 15,36 \text{ MPa} = f_{m,d}$$

– *Vyhovuje*

- Posouzení příčné a torzní stability:

- Kritické napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2 \cdot E_{0,05}}{h \cdot L_{ef}} = \frac{0,78 \cdot 0,22^2 \cdot 9\,400}{1,8 \cdot 10,8} = 18,64 \text{ MPa}$$

*Hodnota L_{ef} vyjadřuje nejkritičtější vzdálenost, kde není zabráněno klopení.

$$L_{ef} = 0,9 \cdot L + 2 \cdot h = 10,8 \text{ m}$$

- Poměrná štíhlost:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{18,64}} = 1,1$$

- Součinitel pro zohlednění příčné a torzní stability pro $0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$:

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} = 1,56 - 0,75 \cdot 1,1 = 0,71$$

- Posouzení MSÚ:

$$\sigma_{m,d} = 3,24 \text{ MPa} < 10,9 \text{ MPa} = 0,709 \cdot 15,36 = f_{m,d} \cdot k_{crit}$$

– Vyhovuje

– Posouzení příčné a torzní stability v kombinaci s tlakem:

- Napětí v tlaku:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed,S}}{A} = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{0,396} = 0,17 \text{ MPa}$$

- Návrhová pevnost v tlaku:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

- Štíhlost ve směru klopení:

$$\lambda_z = \frac{L_{ef}}{i_z} = \frac{10,8}{0,0635} = 170,1$$

- kritická délka mezi podporami proti vybočení

$$L_{ef} = 0,9 \cdot L + 2 \cdot h = 0,9 \cdot 8,0 + 2 \cdot 1,8 = 10,8 \text{ m}$$

- poloměr setrvačnosti ve směru vybočení (určeno pomocí programu AutoCAD)

$$i_z = 0,0635 \text{ m}$$

- Poměrná štíhlost v tlaku:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{170,1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{24}{9400}} = 2,7$$

- Součinitel vzpěrnosti:

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{4,36 + \sqrt{4,36^2 - 2,7^2}} = 0,25$$

- dílčí součinitel vzpěrnosti se zohledněním mat. $\beta_c = 0,1$ pro LLD

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (2,7 - 0,3) + 2,7^2) = 4,36$$

- Posouzení MSÚ:

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

$$\left(\frac{3,24}{10,9} \right)^2 + \frac{0,17}{0,25 \cdot 15,36} = 0,13 < 1,0$$

– *Vyhovuje*

– **Posouzení smyku:**

- Napětí v tlaku:

$$\tau_V = 1,5 \cdot \frac{V_{Ed,s}}{h \cdot b_{eff}} = \frac{94 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 0,147} = 0,355 \text{ MPa}$$

- *efektivní šířka průřezu, zohledňující bobtnání*

$$b_{eff} = b \cdot 0,67 = 0,22 \cdot 0,67 = 0,147 \text{ m}$$

- Návrhová smyková únosnost:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{3,5}{1,25} = 2,24 \text{ MPa}$$

- Posouzení MSÚ:

$$\tau_V = 0,147 \text{ MPa} < 2,24 \text{ MPa} = f_{v,g,d}$$

– *Vyhovuje*

5.4.2. Stojka

Po konzultaci s vedoucím bude prvek navržen se zohledněním ztráty stability vlivem klopení a vzpěru. Ve skutečnosti však bude proti vybočení zajištěn ztužidly a konstrukcí střešního a obvodového pláště.

- **Návrhové vnitřní síly:**

$$M_{Ed} = 385 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,s} = 45 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,s} = 108 \text{ kN}$$

- **Rozměry příčle:**

$$h = 1800 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

- **Průřezové charakteristiky:**

$$A = h \cdot b = 1,8 \cdot 0,22 = 0,396 \text{ m}^2$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,22 \cdot 1,8^2}{6} = 0,119 \text{ m}^3$$

- **Posouzení ohybu v místě rámového rohu:**

- Napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{385 \cdot 10^{-3}}{0,119} = 3,24 \text{ MPa}$$

- Návrhová pevnost v ohybu:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

- Posouzení MSÚ:

$$\sigma_{m,d} = 3,24 \text{ MPa} < 15,36 \text{ MPa} = f_{m,d}$$

– *Vyhovuje*

– **Posouzení příčné a torzní stability:**

- Kritické napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2 \cdot E_{0,05}}{h \cdot L_{ef}} = \frac{0,78 \cdot 0,22^2 \cdot 9\,400}{1,8 \cdot 10,8} = 18,64 \text{ MPa}$$

*Hodnota L_{ef} vyjadřuje nejkritičtější vzdálenost, kde není zabráněno klopení.

$$L_{ef} = 0,9 \cdot L + 2 \cdot h = 10,8 \text{ m}$$

- Poměrná štíhlost:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{18,64}} = 1,1$$

- Součinitel pro zohlednění příčné a torzní stability pro $0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$:

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} = 1,56 - 0,75 \cdot 1,1 = 0,71$$

- Posouzení MSÚ:

$$\sigma_{m,d} = 3,24 \text{ MPa} < 10,9 \text{ MPa} = 0,709 \cdot 15,36 = f_{m,d} \cdot k_{crit}$$

– *Vyhovuje*

– **Posouzení příčné a torzní stability v kombinaci s tlakem:**

- Napětí v tlaku:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed,S}}{A} = \frac{108 \cdot 10^{-3}}{0,396} = 0,27 \text{ MPa}$$

- Návrhová pevnost v tlaku:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

- Štíhlost ve směru klopení:

$$\lambda_z = \frac{L_{ef}}{i_z} = \frac{11,03}{0,0635} = 173,7$$

- kritická délka mezi podporami proti vybočení

$$L_{ef} = 0,9 \cdot L + 2 \cdot h = 0,9 \cdot 8,25 + 2 \cdot 1,8 = 11,03 \text{ m}$$

- poloměr setrvačnosti ve směru vybočení (určeno pomocí programu AutoCAD)

$$i_z = 0,0635 \text{ m}$$

- Poměrná štíhlost v tlaku:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0k}}{E_{0,05}}} = \frac{173,7}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{24}{9400}} = 2,75$$

- Součinitel vzpěrnosti:

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{4,4 + \sqrt{4,4^2 - 2,75^2}} = 0,23$$

- dílčí součinitel vzpěrnosti se zohledněním mat. $\beta_c = 0,1$ pro LLD

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (2,75 - 0,3) + 2,75^2) = 4,4$$

- Posouzení MSÚ:

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

$$\left(\frac{3,24}{10,9} \right)^2 + \frac{0,27}{0,23 \cdot 15,36} = 0,16 < 1,0$$

– Vyhovuje

– Posouzení smyku:

- Napětí v tlaku:

$$\tau_V = 1,5 \cdot \frac{V_{Ed,S}}{h \cdot b_{eff}} = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 0,147} = 0,257 \text{ MPa}$$

- efektivní šířka průřezu, zohledňující bobtnání

$$b_{eff} = b \cdot 0,67 = 0,22 \cdot 0,67 = 0,147 \text{ m}$$

- Návrhová smyková únosnost:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{3,5}{1,25} = 2,24 \text{ MPa}$$

- Posouzení MSÚ:

$$\tau_V = 0,257 \text{ MPa} < 2,24 \text{ MPa} = f_{v,g,d}$$

– Vyhovuje

Závěr

Oba navržené dřevěné profily vyhovují ve všech případech.

5.5. Návrh a posudek dřevěných prvků s vlivem objemových změn, způsobených vlhkostí - například třída provozu 3

5.5.1. Výpočet zatížení, od zamezení smršťování

Pro jehličnaté dřevo je definována objemová změna 0,32% v tangenciálním a 0,16% v radiálním směru, pro změnu vlhkosti o 1%. Ve výpočtu byl uvažován průměr těchto dvou hodnot, tedy 0,24%. Vlhkost při zabudování byla uvažována $w_1=12\%$ a maximální vlhkost, při které dochází k výraznějším objemovým změnám $w_2=30\%$. Rozdíl vlhkostí je tedy 18%. Odtud je získáno přetvoření ε . Následně bylo z Hookova zákona odvozeno vzniklé napětí, působící kolmo k vláknům. Toto napětí bylo do výpočtu vneseno pomocí materiálových vlastností oceli, pro kterou je vyjádřen Youngův modul pružnosti.

$$\Delta w = w_2 - w_1 = 30 - 12 = 18\%$$

$$\varepsilon = 0,24 \cdot \Delta w = 0,24 \cdot 0,18 = 0,0432$$

5.5.2. Posouzení tahu kolmo k vláknům

- Napětí v ocelové desce vlivem objemových změn:

$$\sigma_o = \varepsilon \cdot E = 0,0432 \cdot 210 \cdot 10^3 = 13,6 \text{ MPa}$$

- Youngův modul pružnosti oceli $E = 210 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

- přetvoření vlivem bobtnání a smršťování $\varepsilon = 0,0432$

- Napětí ve dřevěném prvku:

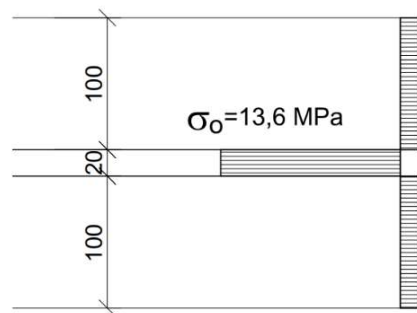
$$\frac{\sigma_o}{t_o} = \frac{\sigma_d}{t_d} \Rightarrow \sigma_d = \sigma_o \cdot \frac{t_o}{t_d} = 13,6 \cdot \frac{20}{200} = 1,36 \text{ MPa}$$

- tloušťka ocelového plechu

$$t_o = 20 \text{ mm}$$

- tloušťka dřevěného prvku

$$t_d = 200 \text{ mm}$$



Obr. 64: Poměr napětí mezi styčnickovým plechem a dřevěným prvkem

- Posudek:

$$\sigma_d = 1,36 \text{ MPa} > 0,32 \text{ MPa} = f_{t,90,g,d}$$

– Nevyhovuje

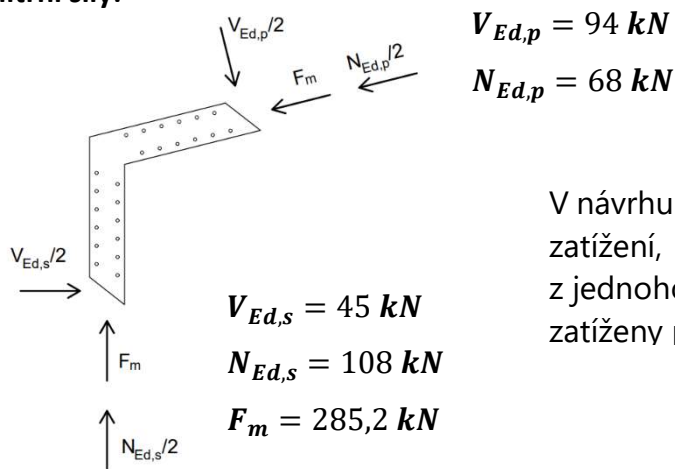
Závěr

Při posouzení vzniklých tahových napětí je evidentní, že do dřevěného prvku je vlivem zamezení dilatace vnášeno napětí větší než čtyřnásobek jeho únosnosti. Pro ocelový plech, s roztečí nejvzdálenějších svorníků 1500 mm, je délková změna 6,5 cm. Proto se tedy jako první opatření nabízí rozdělit tento prvek a omezit velikost délkové změny. Dále tedy bude posouzen rozdělený prvek. Při posuzování byly zanedbány vůle v místě svorníků. Tento předpoklad posouvá výpočet na stranu bezpečnou.

5.5.3. Vstupní údaje

5.5.3.1. Návrhové síly

– Vnitřní síly:

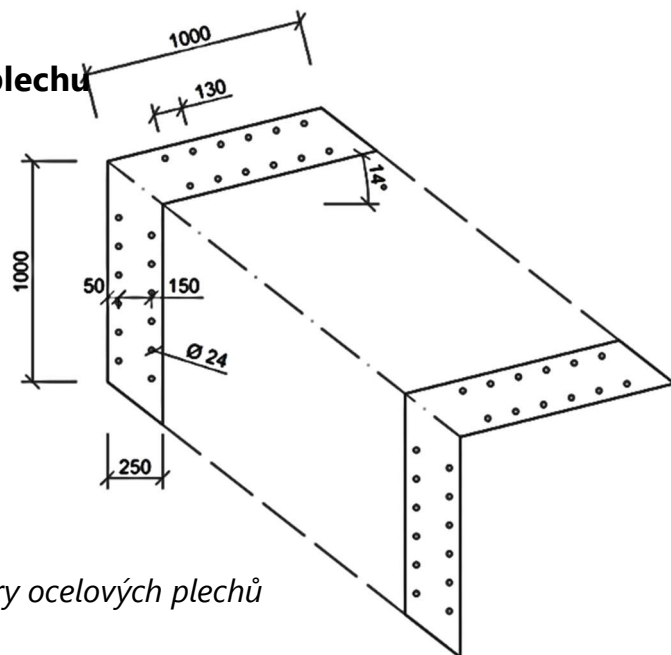


V návrhu je třeba uvažovat jiné působící zatížení, než u styčnickového plechu z jednoho kusu. Jednotlivé prvky budou zatíženy pouze silami

Obr. 65: Zatížení jednoho styčnickového plechu

5.5.3.2. Návrh plechu

– Rozměry desky



Obr. 66: Rozměry ocelových plechů

– Použitá ocel: S235

Tloušťka plechu $t = 20 \text{ mm}$

Plocha neoslabeného průřezu $A = 0,005 \text{ m}^2$

Plocha oslabeného průřezu	$A_{net} = 0,00404 \text{ m}^2$
Mez kluzu	$f_y = 235 \text{ MPa}$
Mez pevnosti	$f_u = 360 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_{M0} = 1,0; \gamma_{M2} = 1,25$

5.5.3.3. Posouzení MSÚ

- Klasifikace průřezu

$$S235 \rightarrow \varepsilon = 1,00$$

$$\frac{c}{t} = \frac{250}{20} = 12,5 < 72 = 72 \cdot \varepsilon$$

1. třída průřezu - Elastický výpočet

A) Tlak-Tah

- Maximální tlaková síla: $N_{Ed,s} = 196,6 \text{ kN}$

- Návrhová únosnost neoslabeného průřezu:

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,005 \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 1\,175 \text{ kN}$$

- Návrhová únosnost oslabeného průřezu:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 0,00404 \cdot 360 \cdot 10^3}{1,25} = 1\,047 \text{ kN}$$

- Posudek:

$$N_{t,Rd} = \max(N_{t,Rd}; N_{u,Rd}) = 1\,175 \text{ kN} \gg 196,6 \text{ kN} = N_{Ed,s}$$

- Vyhovuje

B) Ohyb

- Zatěžovací moment:

- Ohybový moment:

- Maximální posouvající síla: $V_{Ed} = 94 \text{ kN}$

- Rameno síly (odečteno z geometrie): $e = 0,97 \text{ m}$

$$M_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{2} \cdot e = \frac{94}{2} \cdot 0,97 = 45,6 \text{ kNm}$$

- Návrhová únosnost v ohybu:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3,35 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 78,7 \text{ kNm}$$

- Elastický průřezový modul:

$$W_{el} = \frac{t \cdot h_x^2}{6} = \frac{0,02 \cdot 0,317^2}{6} = 3,35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

- Posudek:

$$M_{Ed} = 45,6 \text{ kNm} < 78,7 \text{ kNm} = M_{Rd}$$

– *Vyhovuje*

C) Smyk

- Maximální smyková síla

$$V_{Ed} = 47 \text{ kN}$$

- Návrhová únosnost ve smyku:

$$V_{c,Rd} = \frac{\frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,00404 \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 548 \text{ kN}$$

- Účinná plocha průřezu:

$$A_V = (h - 2 \cdot d) \cdot t = (0,25 - 2 \cdot 0,024) \cdot 0,02 = 0,00404 \text{ m}^2$$

- Posudek:

$$V_{c,Rd} = 548 \text{ kN} > 47 \text{ kN} = V_{Ed}$$

– *Vyhovuje*

5.5.3.4. Závěr

Navržená ocelová deska o tloušťce $t = 20$ mm vyhoví. Dřevěné prvky již není třeba znovu posuzovat. Jelikož v tomto případě dochází k délkovým změnám desetkrát nižším, lze tahová napětí kolmo k vláknům zanedbat. Protože deformace bude z větší části pokryta vůlí v otvorech pro svorníky.

6. Analýza spoje pomocí programu SCIA Engineer

6.1. Model přípoje s jednou styčnickovou deskou

Pro výpočet rámu v programu SCIA Engineer byl pomocí plošných a prutových dílců vymodelován rámový roh se vstupními parametry dle kapitoly 5.3.

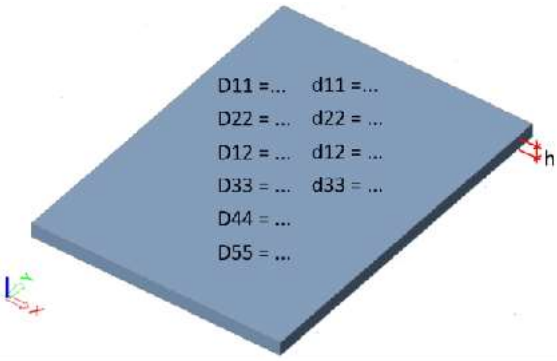
6.1.1. Dřevěné prvky

Pomocí plošných prvků byly nejprve vymodelovány části dřevěných prvků. Pro co největší možné přiblížení reálnému stavu byla využita funkce ortotropie, kdy byly manuálně změněny prvky matice tuhosti lineárně pružného materiálu dle (Obr. 67). Rovněž bylo třeba nastavit směry lokálních systémů prvků.

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & D_{44} & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 \\ & & & & & D_{66} \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ & d_{22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{E_x(1-\nu_{yz}\nu_{zy})}{\Delta} & \frac{E_y(\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{zy})}{\Delta} & \frac{E_z(\nu_{xz}+\nu_{xy}\nu_{yz})}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_x(\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx})}{\Delta} & \frac{E_y(1-\nu_{xz}\nu_{zx})}{\Delta} & \frac{E_z(\nu_{yz}+\nu_{yx}\nu_{xz})}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_x(\nu_{zx}+\nu_{zy}\nu_{yx})}{\Delta} & \frac{E_y(\nu_{zy}+\nu_{zx}\nu_{xy})}{\Delta} & \frac{E_z(1-\nu_{xy}\nu_{yx})}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{\nu_{xy}E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix}$$


$D_{11} = \dots$ $d_{11} = \dots$
 $D_{22} = \dots$ $d_{22} = \dots$
 $D_{12} = \dots$ $d_{12} = \dots$
 $D_{33} = \dots$ $d_{33} = \dots$
 $D_{44} = \dots$
 $D_{55} = \dots$

$D_{11} = 11\,520 \text{ MPa}$
 $D_{22} = 300 \text{ MPa}$
 $D_{12} = 9,3 \text{ MPa}$
 $D_{33} = 300 \text{ MPa}$
 $D_{44} = 650 \text{ MPa}$
 $D_{55} = 65 \text{ MPa}$
 $d_{11} = 11\,510 \text{ MPa}$
 $d_{22} = 300 \text{ MPa}$
 $d_{12} = 9,0 \text{ MPa}$
 $d_{33} = 65 \text{ MPa}$

Obr. 67: Prvky matice tuhosti ortotropního lineárně pružného materiálu [25]

6.1.2. Styčnicková deska a vnesení vlivu smršťování

Ocelová styčnicková deska byla vymodelována obdobně. Tento prvek je navíc využit ke vnesení vlivu smršťování do výpočtu. V programu SCIA Engineer nelze zadat objemové změny dřeva vlivem vlhkosti, a proto bylo použito následné úvahy.

Stanovilo se, že toto napětí bude zadáno pomocí silového zatížení, umístěného na hranách plechu ve směru kolmém na vlákna. Síla byla vyjádřena z Hookova zákona.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \frac{N}{A} = E \cdot \varepsilon \rightarrow N = E \cdot A \cdot \varepsilon$$

$$N = E \cdot A \cdot \varepsilon = 210 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 1000 \cdot 0,0432 = 181\,440 \text{ kN}$$

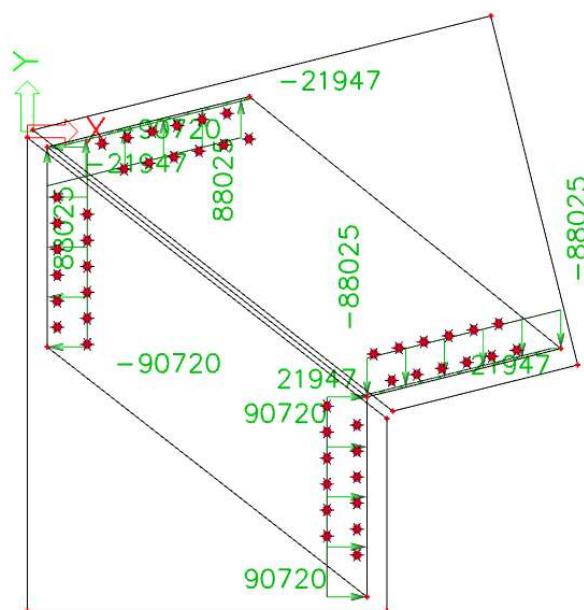
Ocelová deska byla tedy zatížena dvěma opačnými silami o velikosti 90 720 kN (pro zatížení příčně bylo třeba rozložit sílu do směru x a y => $F_x = 21\,947 \text{ kN}$, $F_y = 88\,025 \text{ kN}$).

Pozn.:

První úvahou bylo vnést do spoje napětí pomocí změny teploty ocelového plechu, která vyvodí stejnou deformaci. Z vypočteného přetvoření (v kap. 5.5.1) byla vypočtena ekvivalentní změna teploty, již byl plech následně v modelu zatížen.

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t \rightarrow \Delta t = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{0,0432}{12 \cdot 10^{-6}} = 3600 \text{ }^\circ\text{C}$$

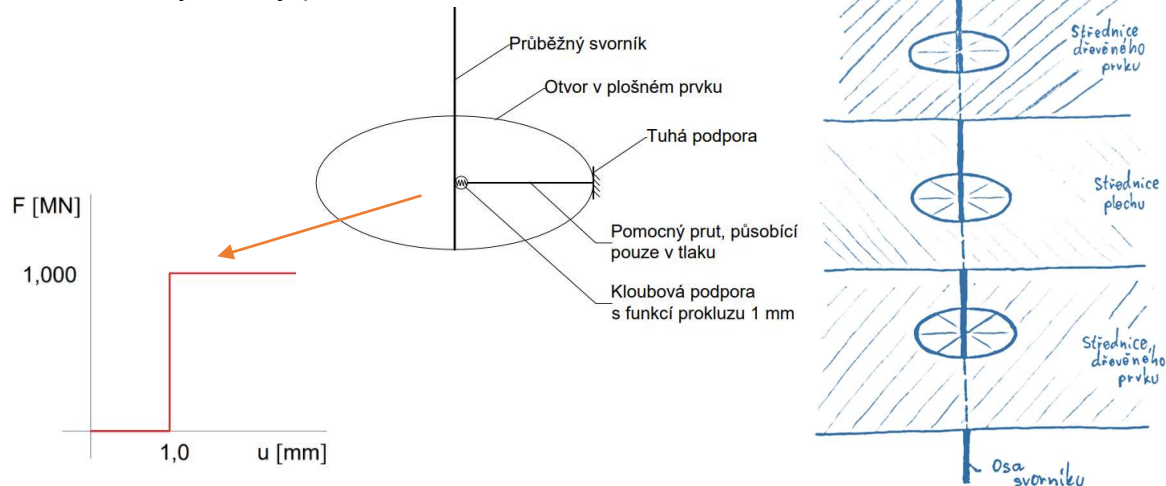
Výsledná ekvivalentní změna teploty, při které vznikne stejná deformace plechu, jako u dřeva při změně vlhkosti o 18%, byla spočtena $\Delta t = 3600 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento postup se však ukázal jako chybný, a to proto, že byl aplikován na plošný prvek, který se roztahuje všesměrně a vyvodí tak napětí také ve směru rovnoběžně s vlákny, což neodpovídá reálnému stavu.



Obr. 68: Silové zatížení od sesychání dřeva

6.1.3. Svorníky

Pro zadání svorníků byly nejprve vytvořeny otvory v deskových tělesech a do nich vloženy prutové ocelové prvky s průměrem a definovaným materiálem svorníků. Ty byly k okraji desky přichyceny pomocí šesti přípojovacích prutů, u nichž bylo vyloučeno tahové namáhání. Bylo také potřeba nastavit správné působení podpor těchto dílčích přípojovacích prutů v místě styku s deskou a kontaktu se svorníkem. Na styku s otvorem desky bylo nastaveno vetknutí, čímž byla umožněna větší variabilita „podpor“ u svorníků. Byla stanovena funkce prokluzu podpory obr. 68, čím byly namodelovány účinky prokluzu.

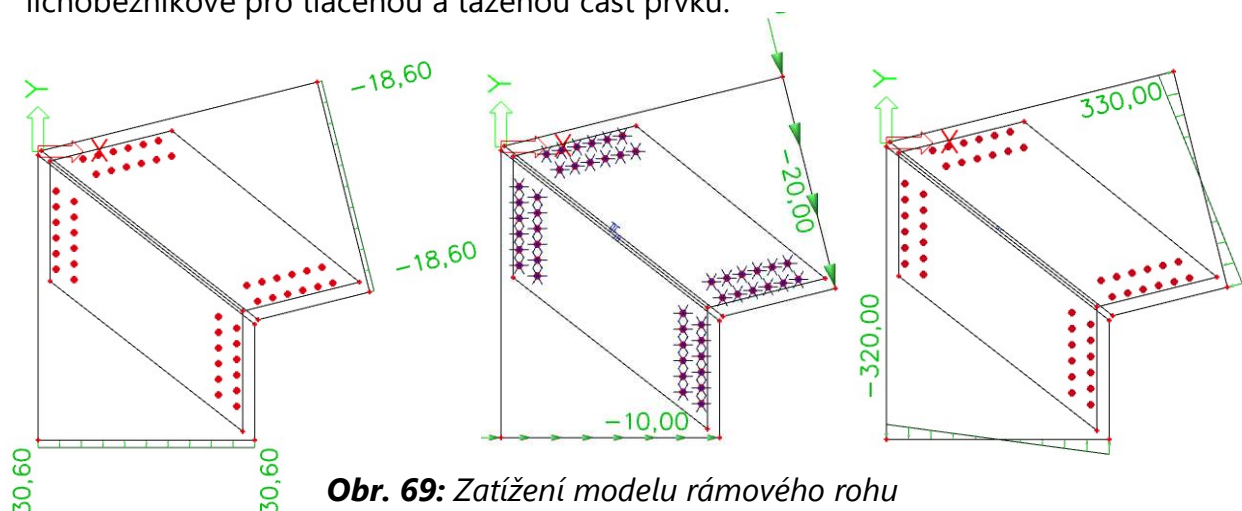


Obr. 69: Propojení deskových prvků pomocí svorníků

6.1.4. Umístění podpor a silového zatížení

Posledním problémem bylo stanovit podpory a zatížit model. Vymodelovaný spoj byl podepřen uprostřed plochy plechu vetknutou podporou.

Model pak byl v čelech dřevěných prvků zatížen liniovým zatížením, které bylo přepočteno na délkovou linii dvou prvků. Posouvající síly jsou umístěny dva metry od osy otáčení, proto byla zadána zredukovaná hodnota a síly, působící na rameni přičteny k momentovému zatížení. Momentové zatížení bylo navíc přepočteno jako lichoběžníkové pro tlačnou a taženou část prvku.

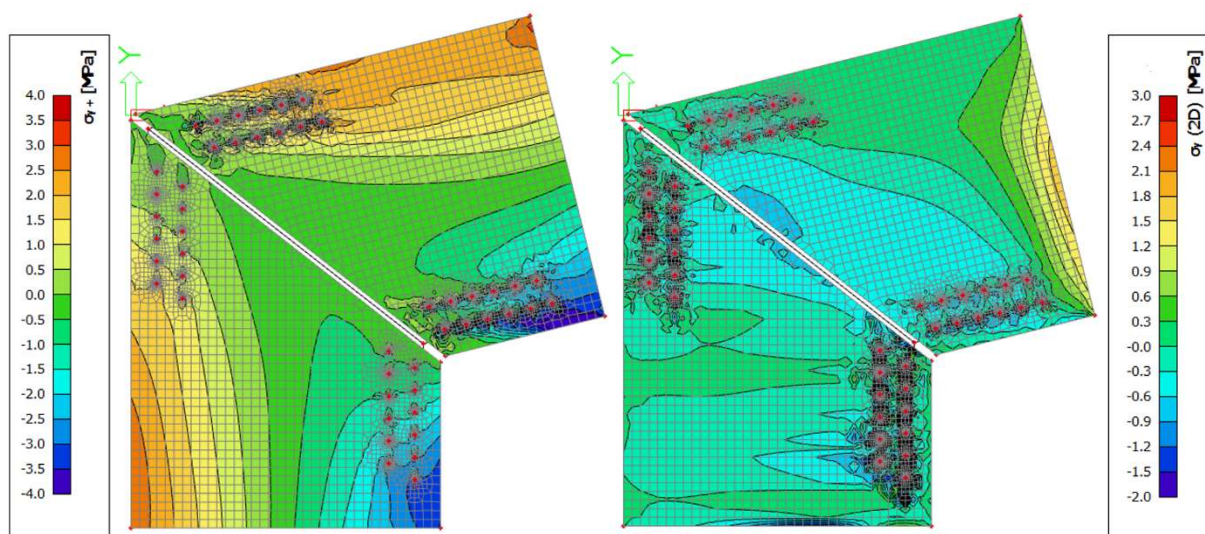


Obr. 69: Zatížení modelu rámového rohu

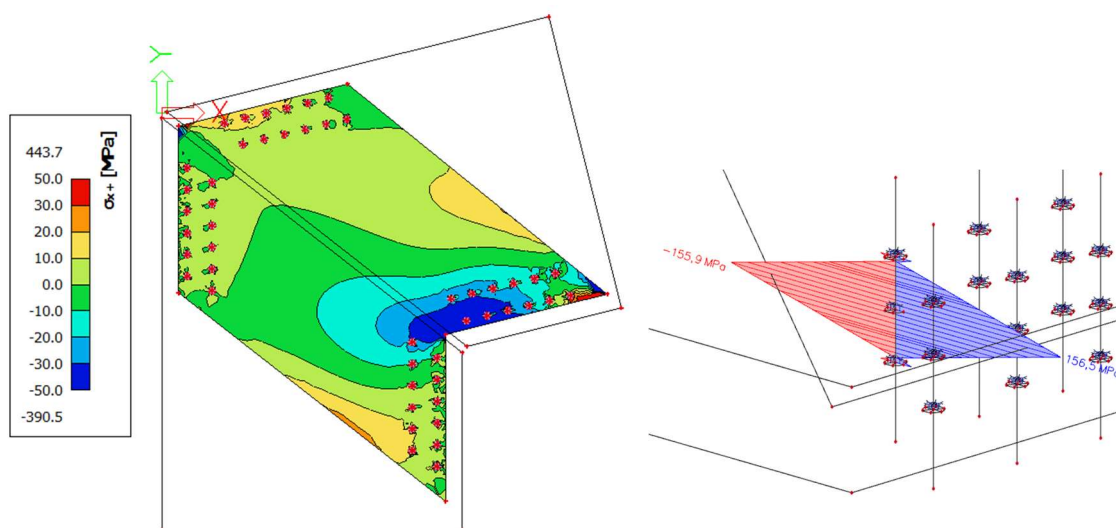
6.2. Výstupy z programu

V této kapitole jsou graficky porovnány výsledky výpočtu v programu SCIA Engineer, a to ve třech případech. První varianta je s jednou velkou styčnickovou deskou bez vlivu objemových změn pro první třídu vlivu prostředí. Druhou je tatáž geometrická varianta, ovšem je již počítáno se zabráněním smršťování. V posledním případě je pak pro tento typ namáhání deska rozdělena na dvě dílčí části.

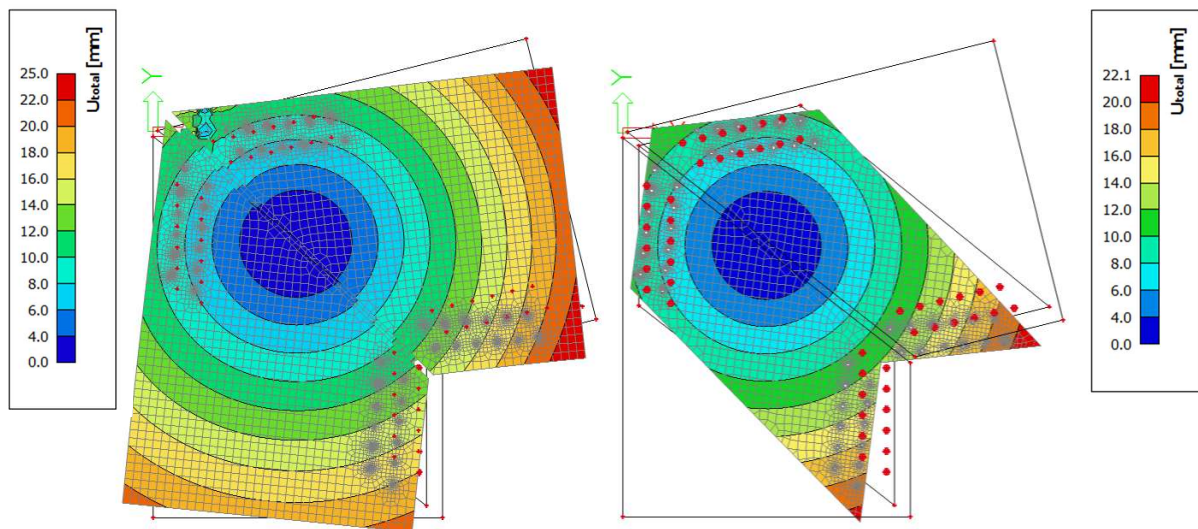
6.2.1. Rámový spoj v 1. třídě vlivu prostředí



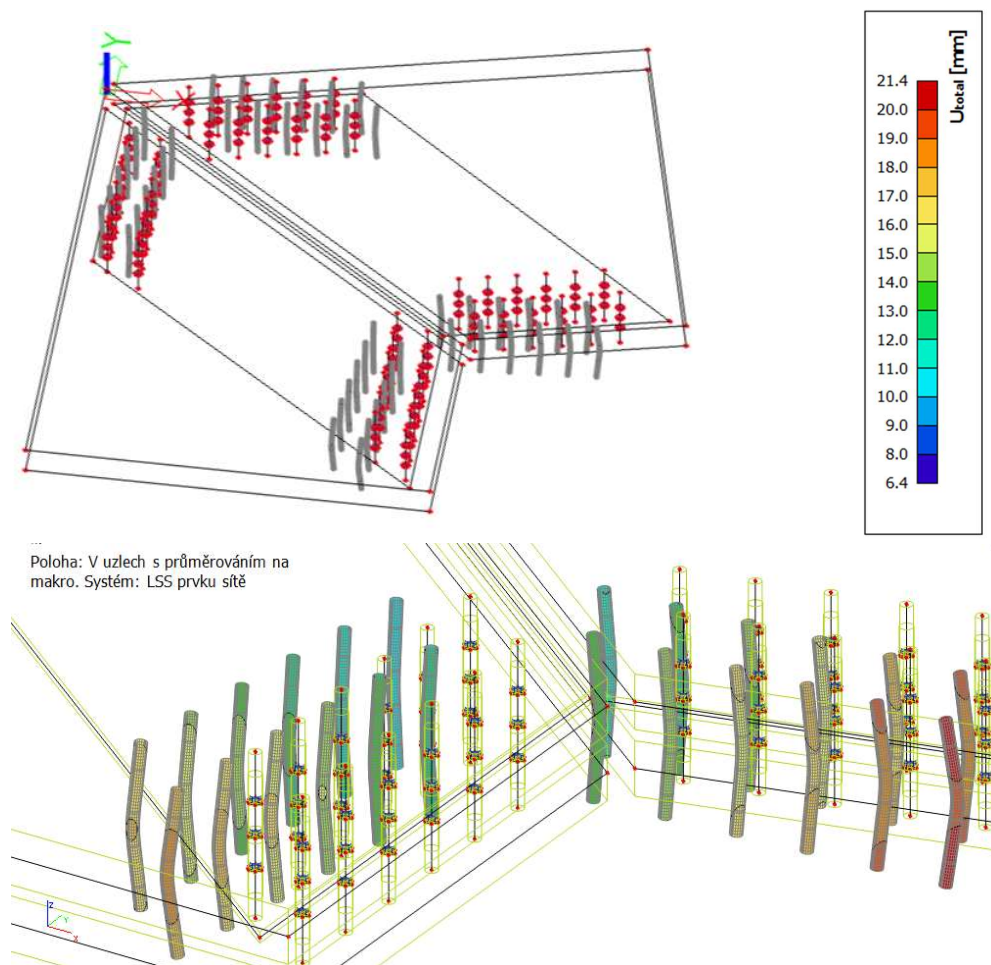
Obr. 70: Napětí ve dřevěných prvcích: σ_x (vlevo), σ_y (vpravo)



Obr. 71: Napětí ve styčnickovém plechu (vlevo) a svorníku (vpravo)

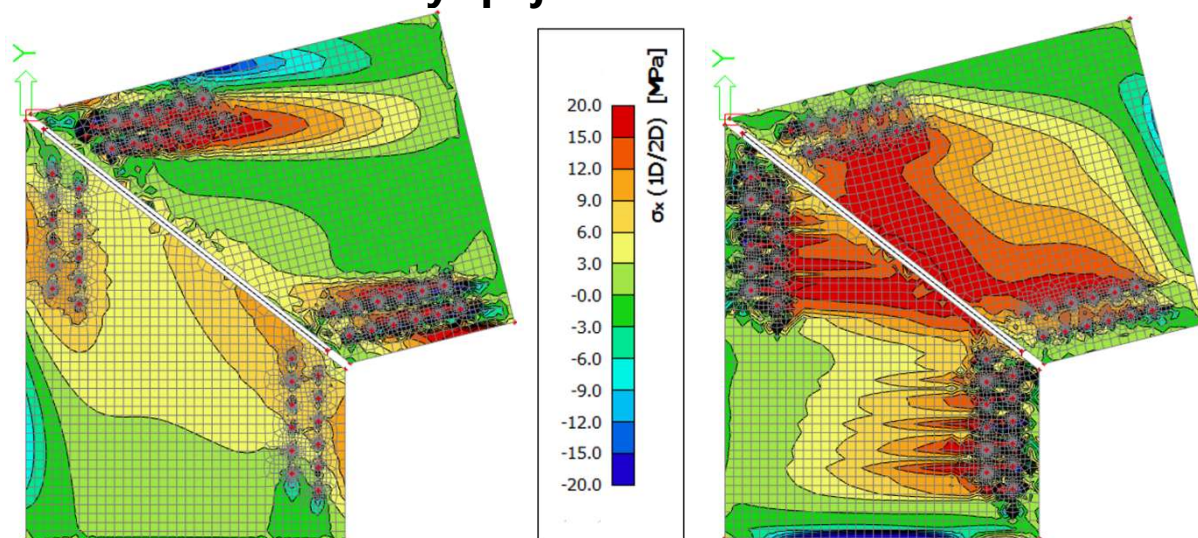


Obr. 72: Deformace dřevěných prvků (vlevo) a styčnickového plechu (vpravo)



Obr. 73: Deformace svorníků

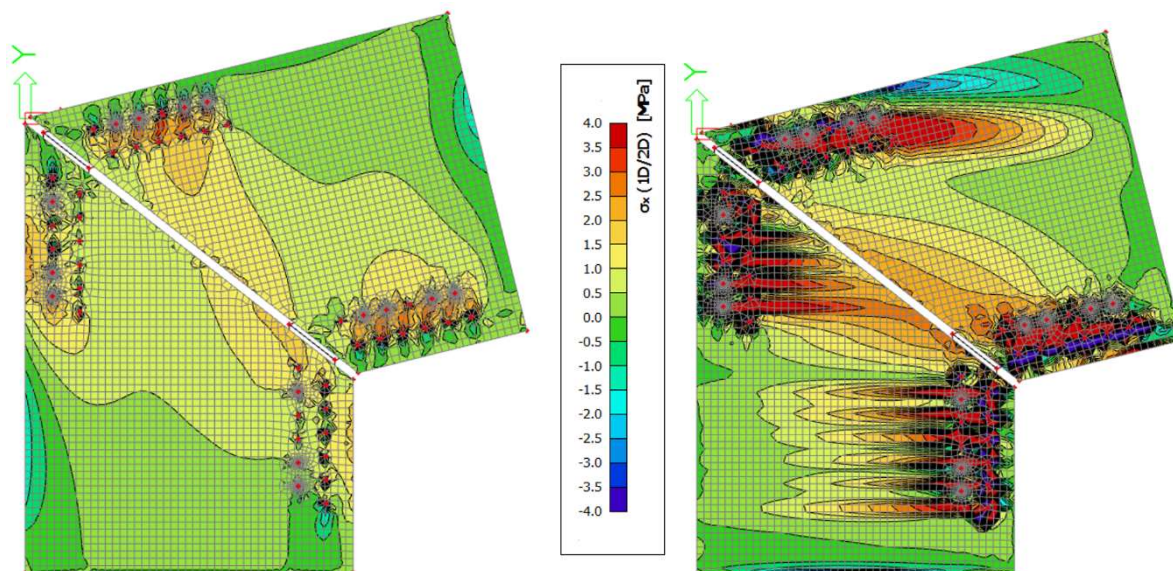
6.2.2. Rámový spoj s uvážením smršťování



Obr. 74: Napětí ve dřevěných prvcích, způsobeno smrštěním dřeva vlivem změny vlhkosti o 18%: σ_x (vlevo), σ_y (vpravo)

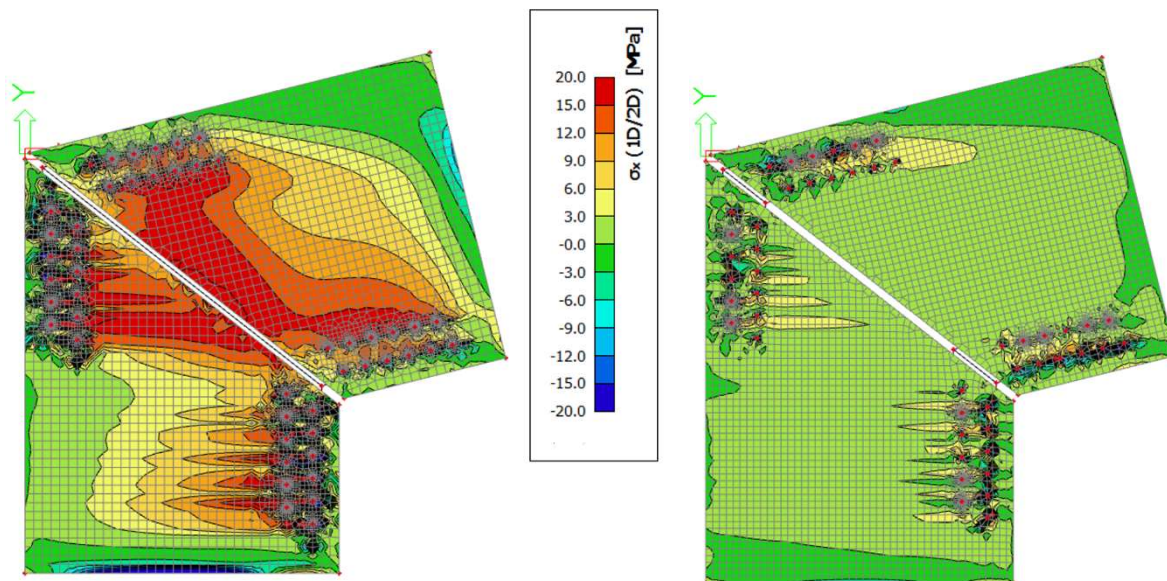
Z výsledků vyplývá, že vzniklá napětí jsou mnohonásobně vyšší než pevnost dřeva v tahu kolmo k vláknům. Je tedy zákonitě nutné, aby v reálném případě vznikly trhliny.

6.2.3. Rámový spoj s uvážením smršťování s rozdělenou styčnickovou deskou



Obr. 75: Napětí ve dřevěných prvcích s rozděleným ocelovým plechem: σ_x (vlevo), σ_y (vpravo)

Také v tomto případě lze ve výpočtovém modelu pozorovat výrazné napětí σ_y a může se zdát, že úprava nebyla efektivní. Jedná se však o výpočetní model a i přes upravenou škálu výsledků se vyskytují špičky napětí, které výsledky zkreslují, proto je uveden následující obrázek s porovnáním progresu při stejné škále výsledků.



Obr. 76: Porovnání napětí vyvozeného zamezením smršťování v případě ocelového plechu výšky 1,5 m (vlevo) a dvou dílčích plechů výšky 0,25 m (vpravo).

7. Závěr

Komplexní návrh tuhých dřevěných spojů zahrnuje množství úskalí, které je třeba nepodcenit a brát v úvahu. Bylo třeba co nejlépe porozumět chování dřevěných konstrukcí. K tomuto účelu bylo vypracováno shrnutí vlastností dřevěných konstrukcí a způsobů spojování. Shrnuty byly rovněž základní statické systémy hal.

Byl také vytvořen přehled nejběžnějších typů rámových spojů s vybranými příklady provedení. Došlo ke shrnutí zásad při jejich návrhu, teoretickému rozboru působení a tuhosti a vytipování základních problémů, spojených s návrhem a realizací.

Následně byl vybrán příklad spoje s ocelovou styčnickovou deskou a spočtena jeho únosnost ve třídě provozu. Pak byl ale vznesen požadavek na výpočet toho, jaký vliv má zamezení volnému smršťování na napětí kolmo k vláknům. Ten samý přípoj byl tedy zatížen teoretickými silami, vnesenými touto skutečností. Po posouzení bylo jednoznačné, že vzniklé napětí, kolmé k vláknům je pro dřevěný prvek neúnosné a je častou příčinou rozštěpení dřevěného prvku v místě spoje. Došlo tedy k návrhu spoje s rozděleným plechem, jehož protažení je tak malé, že téměř žádné přídavné napětí nevzniká.

Nakonec byly vytvořeny modely těchto rohů, díky kterým lze graficky porovnat chování rámového spoje při působení silového zatížení a samotné důsledky změny vlhkosti. Při modelování byl kladen důraz na co nejpřesnější zadání ortotropických vlastností dřeva, zadání prokluzu spojovacích prostředků a pokus o zadání zatížení, vzniklého objemovými změnami dřeva vlivem změn vlhkosti. Výsledné napětí je důkazem, že cesta k modelování problematiky má správný směr. Je však potřeba tuto problematiku prozkoumat mnohem více do hloubky, protože modely jsou pouze teoretickým výpočtem bez podložení průkaznější zkouškou. Jistě by pak došlo k úpravám výpočtových modelů, ať už jejich geometrie, nebo způsobu vnesení zatížení od zamezení volného smršťování a bobtnání.

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] 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.
- [2] ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5. Navrhování dřevěných konstrukcí - část 1-1: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. ICS 91.010.30. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2006.
- [3] Bohumil Koželouh. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 – STEP 1: Navrhování a konstrukční materiály*. Zlín: Bohumil Koželouh – Zlínské tiskárny, 2004. [cit. 2024-05-12]. ISBN 80-238-2620-4.
- [4] Bohumil Koželouh. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 – STEP 2: Navrhování detailů a nosných systémů*. Zlín: Bohumil Koželouh – Zlínské tiskárny. [cit. 2024-05-12]. 1998, ISBN 80-86 769-13-5.
- [5] Příručka 1 – Navrhování dřevěných konstrukcí podle Eurokódu 5 [online]. Pilotní projekt Leonardo da Vinci 2008 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_1_CZ_final.pdf
- [6] Příručka 2 – Navrhování dřevěných konstrukcí podle Eurokódu 5 [online]. Pilotní projekt Leonardo da Vinci 2008 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_2_CZ_final.pdf
- [7] DOLEJŠ, Jakub. 3. Přednáška - SPOJE [online]. Praha: ČVUT v Praze, 25. března 2024
- [8] DOLEJŠ, Jakub. 6. Přednáška - Rámy [online]. Praha: ČVUT v Praze, 15. dubna 2024
- [9] CELLER, Věra. *Konstitutivní modelování dřeva s využitím mikroskopické analýzy*. Praha, 2020. Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [10] VOPATOVÁ, Kristýna. *Pokročilý návrh spojů s ocelovými prvky v dřevěných konstrukcích*. Praha, 2019. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [11] BŘEZINA, Martin. *Návrh a optimalizace rámových rohů dřevěných hal*. Praha, 2019. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [12] Novatop-systém [online]. AGROP NOVA, a.s. Dostupné z: <https://novatop-system.cz/produkt/static/>
- [13] Weyerhaeuser [online]. Weyerhaeuser Company. Dostupné z: <https://www.weyerhaeuser.com/woodproducts/engineered-lumber/parallam-psl/parallam-psl-beams/>
- [14] Archdaily [online]. NZZ. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/>
- [15] NOVÁKOVÁ, Pavla. Přednáška 11 – Šikmé střechy [online]. Valašské Meziříčí: SPŠ stavební Valašské Meziříčí, 10. února 2019
- [16] HASNÍKOVÁ, Hana. Inovace v tesařských spojkách. *Časopis STAVEBNICTVÍ* [online]. Roč. 9, č. 1-2 (2015), str. 12-15. ISSN 1802-2030. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-inovace-v-tesarskych-spojich.html>
- [17] Bova-nail [online]. BOVA Březnice, s.r.o. Dostupné z: <https://bova-nail.cz/>

- [18] Model konstrukce s vkládanými styčnickovými plechy. In: *České stavby* [online]. Český internet, s.r.o. [2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/predstavujeme-prihradove-nosniky-greim-23929.html>
- [19] Graf bobtnání dřeva v závislosti na vlhkosti. In: *tzbinfo* [online]. Copyright Topinfo, s.r.o. [2024-05-12]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/16872-zavislost-fyzikalnich-a-mechanickych-vlastnosti-konstrukcniho-smrkoveho-dreva-na-vlhkosti>
- [20] Ohybový moment, deformovaná střednice a reakce na prutu [online]. Katedra mechaniky, Fakulty stavební ČVUT v Praze. Vytvořeno za podpory projektu FR VŠ 223/2013B1b. Praha 2013
- [21] Dlubal [online]. Dlubal Software, s.r.o. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/stahovani-a-informace/reference/projekty-zakazniku/001250>
- [22] AtelierVAS [online]. Ateliér VAS. Dostupné z: <https://ateliervas.cz/tag/obcanska-vybavenost/>
- [23] Taros NOVA [online]. TAROS NOVA, a.s. Dostupné z: <http://www.taros-nova.cz/jizdarna-pacerice>
- [24] RŮŽIČKA, Jan. Dřevostavby pro nízkoenergetické a pasivní domy [online]. Praha: ČVUT v Praze.
- [25] Dlubal [online]. Dlubal Software, s.r.o. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/podpora/databaze-znalosti/001525>