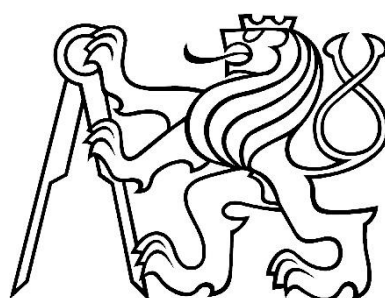


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Styčník sekundární montované ocelové
konstrukce**

Ondřej Novotný

2018

Ing. Marta Kuřiková, Ph.D.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Ondřej Novotný

Poděkování

Autor chce tímto poděkovat především Ing. Martě Kuřikové, Ph.D. za vedení této práce a za všechny odborné a cenné rady. Dále patří díky společnosti Hilti ČR, spol. s.r.o. za poskytnutí materiálu na experiment, zejména Ing. Zuzaně Kubicové za vřelou pomoc při realizaci experimentu.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|--|----------------|----------------------|
| Příjmení: Ondřej | Jméno: Novotný | Osobní číslo: 439047 |
| Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí | | |
| Studijní program: Stavební inženýrství | | |
| Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb | | |

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

| | |
|--|---|
| Název bakalářské práce: Styčnick sekundární montované ocelové konstrukce | |
| Název bakalářské práce anglicky: Joint of secondary assembled steel structure | |
| Pokyny pro vypracování: Shrnutí problematiky, experimentální stanovení tuhosti přípoje, globální chování styčnicku, analýza pomocí návrhového numerického modelu, verifikace výsledků | |
| Seznam doporučené literatury: Podklady výrobce, WALD, F. Navrhování styčnicků, 1999. Wang et al. Behaviour of demountable steel and composite beam-to-column connections, 2016 | |
| Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Marta Kuřiková, Ph.D. | |
| Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2018 | Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i> |
| Podpis vedoucího práce | Podpis vedoucího katedry |

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |
|-----------------------|---------------------|

Abstrakt

Tato práce se věnuje chování a klasifikování styčnicků a stanovení počáteční rotační tuhosti konkrétního styčnicku. V práci je stanovena tuhost styčnicku systémové konstrukce pomocí experimentu, analytického výpočtu metodou komponent a numerickou metodou výpočtu programem pro analýzu styčnicků, která je založena na metodě konečných prvků a metodě komponent. Výstupy návrhových modelů jsou validovány na výsledcích experimentu. V závěru práce je získaná ohybová tuhost styčnicku využita při globální analýze technologické systémové konstrukce.

Klíčová slova: klasifikace a chování styčnicku, rotační tuhost styčnicku, technologické systémové montované konstrukce

Abstract

The bachelor thesis deals with a behaviour and a classification of joints and a determination of a rotational stiffness of a specific steel joint. The determination of the rotational stiffness of a technological system joint is based on an experiment, the component method and the component based finite element analysis. Outputs of design models are validated on experimental results. At the end of the work is the obtained rotational stiffness applied in global analyses of a technological system structure.

Key words: classification and behaviour of joints, initial rotational stiffness, assembled technological steel construction

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 8 |
| 2 | Analýza chování styčnicku..... | 9 |
| 2.1 | Vliv tuhosti styčnicků na ohybový moment..... | 9 |
| 2.2 | Pracovní diagramy styčnicku..... | 11 |
| 2.3 | Sečná rotační tuhost..... | 15 |
| 2.4 | Rotační kapacita styčnicku..... | 16 |
| 2.5 | Klasifikace styčnicků..... | 18 |
| 2.5.1 | Klasifikace podle tuhosti..... | 18 |
| 2.5.2 | Klasifikace podle únosnosti..... | 21 |
| 3 | Postup návrhu styčnicků..... | 23 |
| 4 | Sekundární montované konstrukce..... | 24 |
| 4.1 | Zkoumaný styčnick..... | 24 |
| 4.1.1 | Nosný systém..... | 24 |
| 4.1.2 | Přípoj..... | 25 |
| 4.1.3 | Postup montáže přípoje..... | 27 |
| 4.1.4 | Statické schéma a působení konstrukce..... | 29 |
| 5 | Stanovení ohybové tuhosti styčnicku..... | 31 |
| 5.1 | Experiment..... | 31 |
| 5.1.1 | Návrh sestavy konstrukce..... | 31 |
| 5.1.2 | Předpokládané porušení..... | 32 |
| 5.1.3 | Průběh experimentu..... | 33 |
| 5.1.4 | Výstupy experimentu..... | 35 |
| 5.1.5 | Pracovní diagram styčnicku..... | 37 |
| 5.1.6 | Ohybová tuhost styčnicku..... | 39 |
| 5.2 | Výpočet metodou komponent..... | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2.1 | Postup výpočtu metodou komponent | 41 |
| 5.3 | Analýza konečnými prvky s komponentami | 44 |
| 5.3.1 | Výstupy softwaru IDEA StatiCa | 45 |
| 5.3.2 | Výpočet konečnými prvky s komponentami | 46 |
| 6 | Klasifikace styčnicku..... | 48 |
| 7 | Analýza konstrukce s využitím rotační tuhosti..... | 50 |
| 8 | Závěr | 52 |
| | Použitá literatura | 53 |

1 Úvod

Styčníky konstrukcí významně ovlivňují jejich statické chování bez ohledu na materiál nebo typ konstrukce. Při nesprávném návrhu se ze styčnicku stává potenciální místo porušení konstrukce nebo je naopak příliš nákladnou položkou. Z těchto důvodů je nutné problematiku návrhu styčnicků a jeho optimalizaci blíže studovat. V rámci této optimalizace musí projektant upustit od klasických ideálních modelů styčnicků, jako vetknutí nebo kloubu a blíže zkoumat rotační tuhost spolu s dalšími parametry styčnicku, které lépe popíší jeho chování a rozdělení vnitřních sil a díky kterým může vzniknout efektivnější a ekonomičtější návrh.

Někteří výrobci označují ve svých portfoliích sekundární konstrukce jako ty, co podpírají střešní a stěnové pláště a které přenášejí zatížení na primární konstrukci stavby. Jedná se například o střešní vaznice, stěnové paždíky atd. V této práci je slovo použito spíše ve významu technologické konstrukce, která není součástí nosné konstrukce stavby a svým působením tedy nepřispívá k jejímu statickému působení, ale slouží k podepření především technických zařízení budov jako například potrubí, vzduchotechnických jednotek, čerpadel, vzduchových clon atd.

Cílem této práce je stanovení rotační tuhosti styčnicku sekundární konstrukce experimentem a výpočetními metodami a porovnávání působení mezi teoretickými modely kloubu a vetknutí.

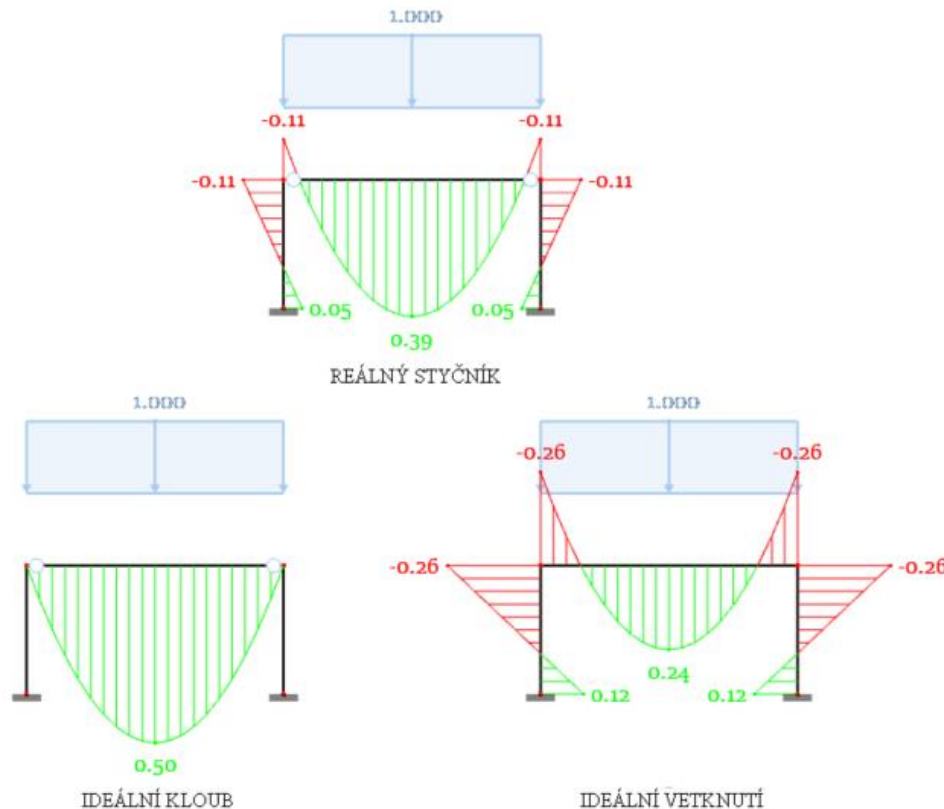
2 Analýza chování styčnicku

2.1 Vliv tuhosti styčnicků na ohybový moment

Jedním z důvodů zkoumání styčnicků je jejich vliv na statické působení konstrukce. V této kapitole je na jednoduchých reálných případech demonstrováno skutečné chování styčnicku, rozdíl působení mezi ideálními modely a průběhem ohybových momentů.

Jako první příklad je vybrána jednoduchá rámová rovinná konstrukce s rovnoměrným spojitým zatížením na vodorovném nosníku a s vetknutými sloupy v rozměrech adekvátních sekundární konstrukci. Následující výsledky lze očekávat i od podobně sestavených konstrukcí bez ohledu na dimenzi nosných prvků nebo samotných rozměrů konstrukce. Důvodem zkoumání právě sekundární konstrukce je pouze lepší zasazení do kontextu této práce.

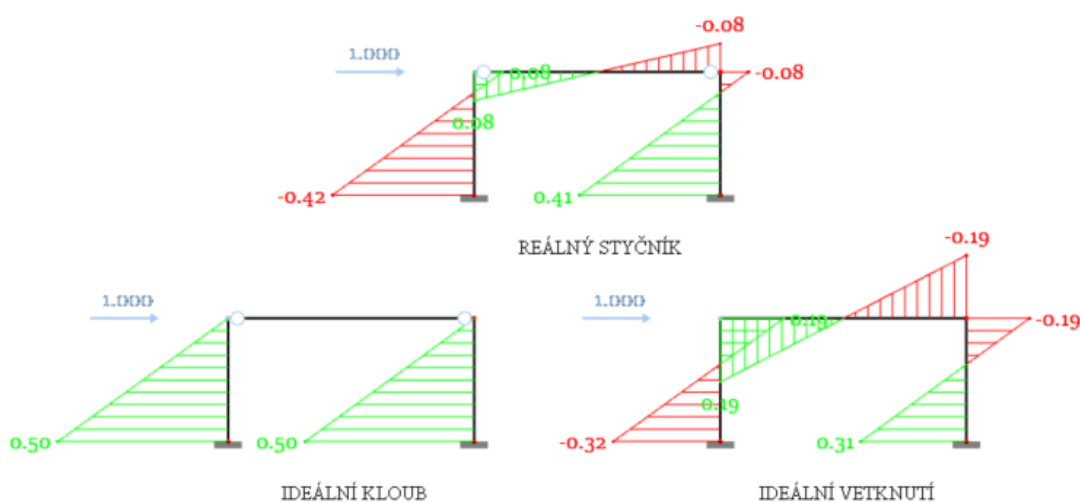
Následující obrázky jsou výsledkem statického výpočtu studentské verze softwaru RSTAB společnosti Dlubal Software s.r.o.



Obr. 1: Rozdělení ohybových momentů v závislosti na typu styčnicku – svislé zatížení

V modelu, kdy je vodorovný nosník připojen ideálním kloubem, nevznikají kvůli nulové rotační tuhosti styčnicku záporné momenty, nosník je prostě uložen na sloupy. Nenulová rotační tuhost reálného styčnicku má za následek přerozdělení kladného momentu v poli nosníku nad podporou na záporný moment, viz obr. 1. Poměr ohybového momentu nad podporou a v poli vodorovného nosníku závisí při stejné ohybové tuhosti použitých profilů právě na tuhosti styčnicku rámového rohu. Extrémním případem tohoto jevu je v případě nekonečně tuhého spoje vetknutý vodorovný nosník mezi sloupy.

Ve druhém příkladu, viz obr. 2, je znázorněn průběh ohybového momentu na stejné konstrukci při bočním zatížení. Toto zatěžovací schéma reprezentuje sílu například od zatížení větrem.



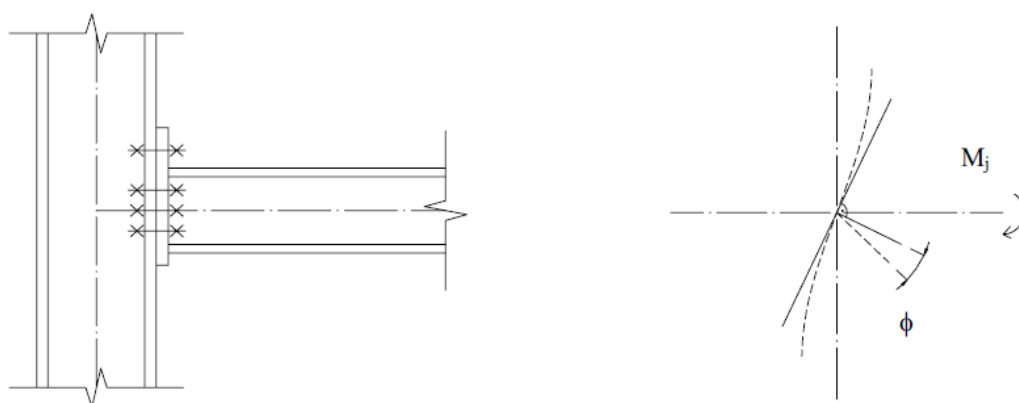
Obr. 2: Rozdělení ohybových momentů v závislosti na typu styčnicku – boční zatížení

Tuhost připojení sloupu k základové konstrukci by se v reálném návrhu také neměla zanedbávat, nicméně v těchto případech byla tuhost patky uvažována jako mnohem větší než tuhost rámového rohu. Rámový roh modelovaný jako tuhý přenáší větší část zatížení v porovnání s reálnou konstrukcí. To může vést k poddimenzování kotvení sloupu nebo profilu sloupu v patě konstrukce.

Jednoduché příklady tedy měly demonstrovat, proč je ideální statické schéma při optimalizovaném návrhu konstrukce nedostačující a že v mnohých případech se může například kvůli nezkušenosti projektanta chování modelu a konstrukce lišit.

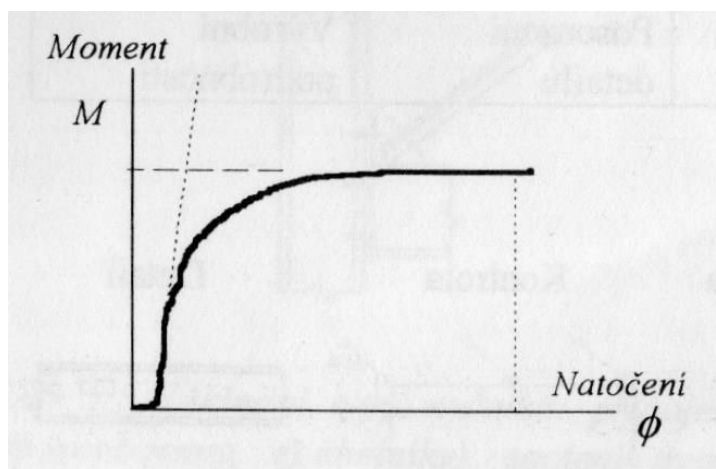
2.2 Pracovní diagramy styčnicku

V předchozí kapitole bylo popsáno, jakým způsobem ovlivňuje rotační tuhost styčnicku přerozdělení ohybového momentu na konstrukci. Dalším faktorem, který je potřeba vzít v úvahu při grafickém znázornění problematiky, je geometrické uspořádání připojovaných prvků, respektive jejich střednicových os. Úhel odklonění střednice připojovaného nosníku od kolmice k ose sloupu může být označen jako natočení styčnicku. Grafická interpretace je znázorněna na obr. 3.



Obr. 3: Natočení styčnicku ϕ při působení momentu M_j v přípoji nosníku na sloup (Bajer, 2005)

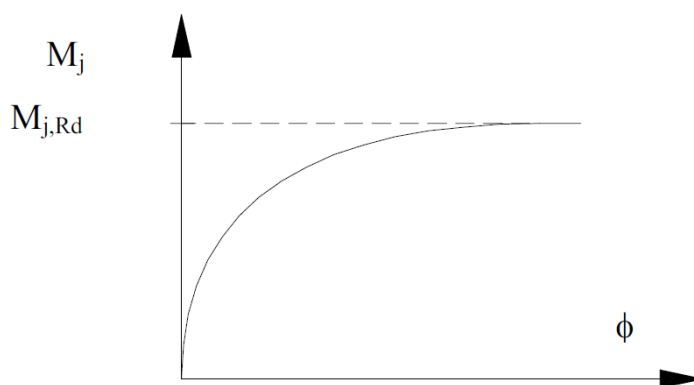
Závislost natočení připojeného nosníku v místě připojení a ohybového momentu, který styčnick přenáší na sloup konstrukce, se nazývá pracovní diagram styčnicku, viz obr. 4. (Wald a Sokol, 1999)



Obr. 4: Pracovní diagram reálného styčnicku (Wald a Sokol, 1999)

Z obr. 4 je zřejmé, že průběh funkce závislosti ohybového momentu na natočení je nelineární. Dále lze poznamenat, že tuhost styčnicku je vyjádřena jako tangenta spojnice příslušného bodu grafu a počátku grafu. Z tohoto výroku je možné odvodit jednotky rotační tuhosti – **kNm/rad**. (Bajer, 2005)

Následující obrázek deklaruje rozdíl mezi skutečným a teoretickým průběhem funkce. Zatímco na obr. 4 jsou patrné nepravidelnosti průběhu a v počátku grafu pouze mírný nárůst ohybového momentu vlivem například aktivace šroubů nebo dosednutím plechu šroubovaného styčnicku, na obr. 5 je znázorněn hladký průběh již při minimálních natočeních.



Obr. 5: Teoretická závislost ohybového momentu na natočení styčnicku (Bajer, 2005)

Z uvedených obrázků je zřejmé, že směrnice spojnice je v každém bodě grafu odlišná. Tato skutečnost značně komplikuje návrh konstrukce. Při analýze konstrukce se styčnicku, které mají průběh chování stejný jako na obr. 5, by byla na základě předběžného statického výpočtu pootočení odečtena z diagramu hodnota ohybového momentu a tímto bodem by byla vedena spojnice s počátkem. Tangenta spojnice je předběžná rotační tuhost styčnicku, která je dosazena zpět do statického výpočtu a je stanoveno nové pootočení styčnicku. Proces se opakuje tolikrát, dokud se hodnota tangenty výrazně neliší od předchozí hodnoty a vede tedy k poměrně náročnému a nepraktickému iteračnímu procesu.

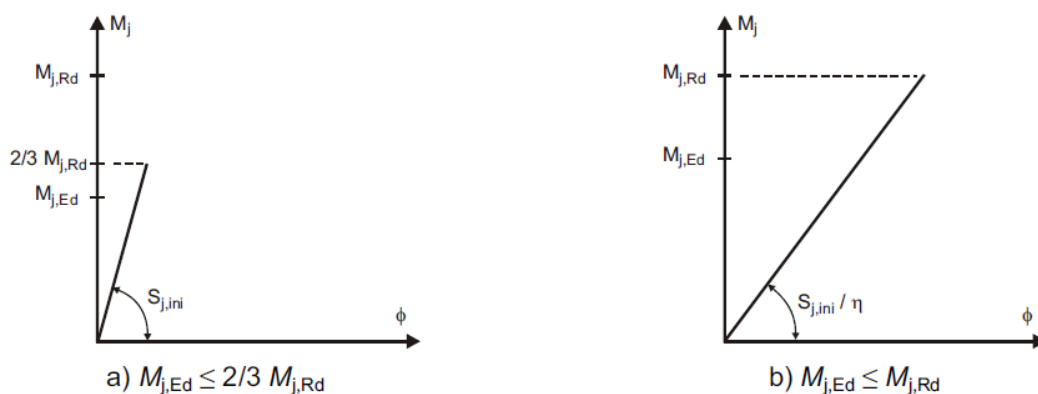
Z tohoto důvodu je praktické linearizování průběhu pracovního diagramu styčnicku částmi křivek, jejichž směrnice je v daném úseku funkce konstantní. Tento krok přinese za cenu nepřesnosti výpočtu výrazné zjednodušení statických výpočtů.

Volba idealizovaného průběhu tuhosti styčnicku závisí podle normy (EN 1993-1-8, 2005) na klasifikaci styčnicku a na zvolené metodě analýzy konstrukce. Norma nabízí tři základní zjednodušené modely globální analýzy například bilineární průběh, s podmínkou, že zjednodušený průběh se má v grafu celý nacházet pod skutečnou závislostí momentu a natočení. Norma také doplňuje, za jakých podmínek mohou být zjednodušené modely globální analýzy aplikovány.

Pružná analýza

Podle normy (EN 1993-1-8, 2005) může být použita pružná analýza za předpokladu, že styčnicku byly správně klasifikovány podle rotační tuhosti a mají dostatečnou únosnost k přenesení vnitřních sil vycházejících z analýzy konstrukce.

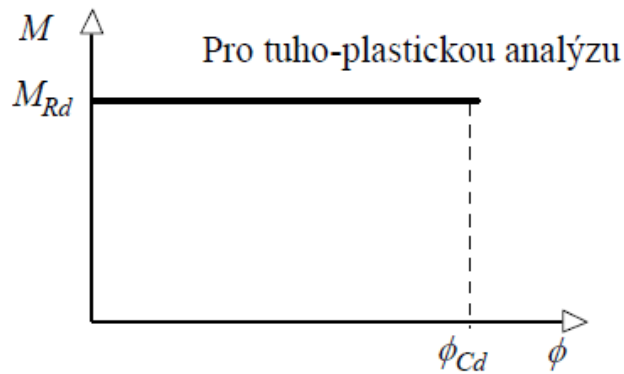
Pokud $M_{j,Ed}$ polotuhého styčnicku nepřekročí $2/3 M_{j,Rd}$, viz obr. 6 a), je možné uvažovat pro pružnou globální analýzu počáteční rotační tuhost styčnicku $S_{j,ini}$. V případě, že $M_{j,Ed}$ překročí tuto hranici, viz obr. 6 b), pak se rotační tuhost styčnicku uvažuje jako $S_{j,ini}/\eta$, kde η je součinitel rotační tuhosti uvedený v normě a závisí na typu připojení a připojovaných prvků.



Obr. 6: Rotační tuhost při globální pružné analýze (EN 1993-1-8, 2005)

Tuho-plastická analýza

Tuho-plastická analýza je pro obecné styčnicku omezena podmínkou, že styčnicku musí být klasifikovány podle jejich únosnosti a musí dovolit dostatečné natočení, které vyplývá z analýzy konstrukce, viz obr. 7.

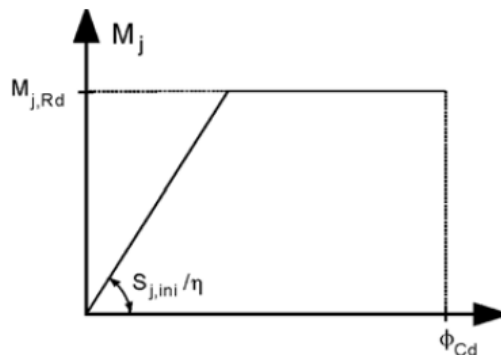


Obr. 7: Rotační tuhost při globální tuho-plastické analýze (Wald, 2003)

Pružně-plastická analýza

Pružně-plastická analýza může být použita, pokud je styčnick klasifikován podle rotační tuhosti, ale zároveň i únosnosti. Závislost momentu a natočení se má použít k určení distribuce vnitřních sil a ohybového momentu.

Na rozdíl od pružné analýzy je v tomto případě počáteční rotační tuhost $S_{j,ini}$ rovnou redukována součinitelem rotační tuhosti η bez dalších podmínek, viz obr. 8.



Obr. 8: Průběh rotační tuhosti při pružně-plastické analýze (EN 1993-1-8, 2005)

Poslední idealizovaný model je zároveň podle (Wald a Sokol, 1999) nejvhodnější pro metodu spolehlivosti konstrukce založené na mezních stavech a analýze konstrukce metodou konečných prvků.

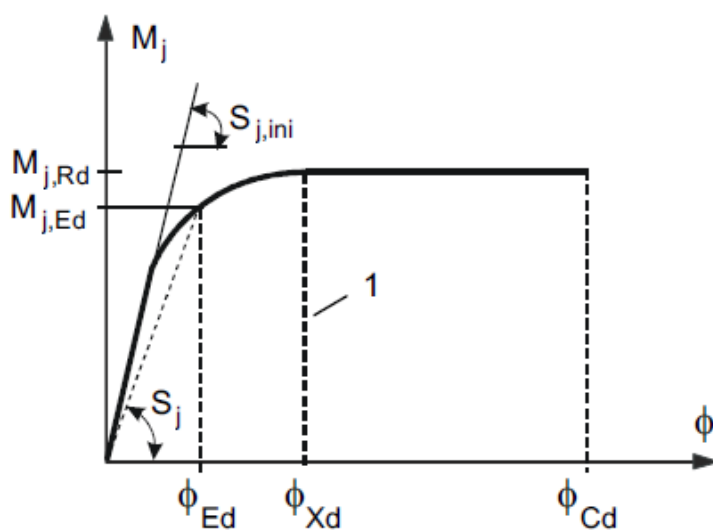
Další ze způsobů idealizování křivky grafu momentu a natočení je pomocí výrazných bodů křivky M_y , M_u , které jsou hranicí lineárního průběhu a přechod mezi nimi je matematicky vyjádřen a doplněn do celistvé křivky. Průběh je tedy nejprve lineární, poté obecný a opět lineární (Wald a Sokol, 1999).

2.3 Sečná rotační tuhost

V předchozí kapitole je uvedeno, že počáteční rotační tuhost popisuje chování styčnicku na lineární části zjednodušeného pracovního diagramu styčnicku. Ta je ale v pružné analýze limitována ohybovým momentem $2/3 M_{j,Rd}$. Při překročení tohoto momentu dochází ke snižování rotační tuhosti styčnicku a průběh pracovního diagramu přechází v nelineární část, které už neodpovídá počáteční, ale sečná rotační tuhost styčnicku.

Sečná tuhost S_j vyjadřuje vztah mezi ohybovým momentem a natočením na nelineární části pracovního diagramu styčnicku a používá se pro stanovení tvaru deformované konstrukce (Wald a Sokol, 1999), viz obr. 9.

Limitní hodnotou natočení sečné tuhosti, tj. maximální natočení, do kterého lze uvažovat sečnou rotační tuhost podle následujících vzorců, je pootočení ϕ_{Xd} , kterému odpovídá návrhový moment styčnicku $M_{j,Rd}$.



Obr. 9: Sečná rotační tuhost na nelineární části pracovního diagramu (EN 1993-1-8, 2005)

Norma (EN 1993-1-8, 2005) uvádí vzorec pro výpočet počáteční i sečné rotační tuhosti, který vychází z pružných deformací komponentů použitých v přípoji. Použití následujícího vzorce je, podobně jako u sečné tuhosti, limitováno hodnotou návrhového momentu styčnicku $M_{j,Rd}$.

Vzorec pro stanovení rotační tuhosti styčnicku (EN 1993-1-8, 2005):

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (1)$$

kde:

E je Youngův modul pružnosti materiálu

z je vzdálenost dvojice sil působících ve styčnicku

μ je součinitel poměrné tuhosti

k_i tuhost komponent styčnicku

Součinitel poměrné tuhosti μ vyjadřuje poměr mezi počáteční a sečnou tuhostí. V lineární části křivky grafu pracovního diagramu, tedy když $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$, platí, že $\mu = 1$, a výpočet odpovídá počáteční rotační tuhosti.

Pro nelineární část, ve které platí vztah $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$, se součinitel μ spočte z následujícího vztahu (EN 1993-1-8, 2005):

$$\mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\Psi \quad (2)$$

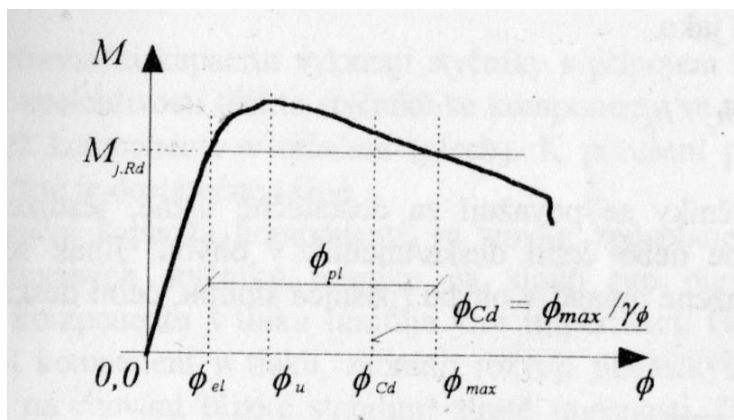
kde součinitel Ψ odpovídá typu a umístění připojení. Výpočet tuhosti pro nelineární část odpovídá sečné rotační tuhosti styčnicku.

2.4 Rotační kapacita styčnicku

Rotační kapacita neboli plastické mezní natočení styčnicku je natočení, které může při přenášení vnitřních sil styčnick využít bez omezení plastické únosnosti jednotlivých komponent. Obecně platí, že vhodně navržené styčnicky jsou charakteristické vysokou tažností. Proto jsou styčnicky z jiných materiálů o nízké tažnosti doplňovány ocelovými prvky za účelem zvětšení rotační kapacity styčnicku. (Wald a Sokol, 1999).

Pracovní diagram styčnicku na obr. 10 je specifický právě velkou tažností komponent, která má za následek vysokou rotační kapacitu. Při překročení návrhového momentu styčnicku $M_{j,Rd}$ nedojde při dalším natočení k okamžitému poklesu přenášeného momentu a následnému kolapsu konstrukce, ale dochází k dalším deformacím komponent a přenášením ohybového momentu. Když je plastická únosnost komponent vyčerpána, křivka pracovního diagramu klesne opět na hodnotu

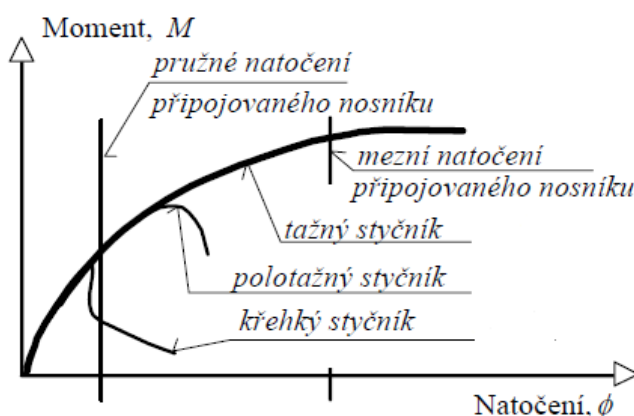
$M_{j,Rd}$, které odpovídá hodnota mezního natočení ϕ_{max} a další nárůst pootočení styčnicku může mít za následek selhání konstrukce.



Obr. 10: Plastické mezní natočení styčnicku (Wald & Sokol, 1999)

Požadovaná spolehlivost mezního natočení ϕ_{Cd} není normou přímo definovaná. Dostatečného mezního natočení styčnicku je dosaženo dodržováním konstrukčních zásad. Za tažné styčnicku se považují ty, u kterých dojde k porušení v tažené komponentě. Jednou ze zásad návrhu šroubovaného styčnicku například je, že u styčnicků, jejichž šrouby jsou namáhány smykem, se únosnost šroubů navrhuje na větší sílu tak, aby styčnick selhal otlačením spojovaných prvků, které jsou dostatečně tažné. (Wald a Sokol, 1999)

Na obr. 11 jsou porovnány rotační kapacity styčnicků s rotační kapacitou připojovaného prvku.



Obr. 11: Porovnání rotačních kapacit styčnicků (Wald, 2003)

2.5 Klasifikace styčnicků

Klasifikace styčnicků je potřebná k zvolení vhodného idealizovaného průběhu pracovního diagramu. V této kapitole je uvedeno, jak norma (EN 1993-1-8, 2005) přistupuje k rozdělení styčnicků podle rotační tuhosti a únosnosti styčnicku.

2.5.1 Klasifikace podle tuhosti

Norma (EN 1993-1-8, 2005) rozlišuje dva postupy pro stanovení třídy styčnicku podle tuhosti zvlášť pro vnitřní styčnický konstrukce a patky sloupů.

Vnitřní styčnický se podle normy klasifikují na základě počáteční rotační tuhosti $S_{j,ini}$ v porovnání s rozhraními uvedenými na obr. 12. Styčnick může být klasifikován jako kloubový, polotuhý nebo tuhý. Norma také připouští klasifikování na základě předchozích poznatků podobných aplikací nebo na základě analytických výpočtů založených na výsledcích experimentu.

Kloubový styčnick

Kloubový styčnick musí podle normy přenášet vnitřní síly z připojeného prvku bez vyvolání významné hodnoty ohybového momentu, který by ovlivnil další prvky konstrukce a musí dovolit výsledné natočení při návrhovém zatížení. Zároveň musí styčnick splňovat následující kritérium:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 EI_b / L_b \quad (3)$$

kde

E je Youngův modul pružnosti

I_b je moment setrvačnosti připojeného nosníku

L_b rozpětí nosníku (vzdálenost os sloupů)

Tuhý styčnick

Za tuhý styčnick se považuje ten, který má vysokou rotační tuhost a splňuje následující kritérium:

$$S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b \quad (4)$$

kde

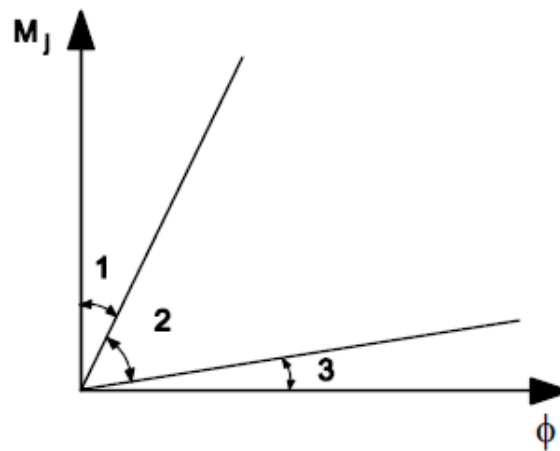
$k_b = 8$ pro vyztužené rámy, jejichž vodorovná deformace je ztužením zredukována na 80 %

$k_b = 25$ pro ostatní rámy, u kterých platí, že $k_b/k_c \geq 0,1$
(kde k_b a k_c vychází ze vztahu $I_{b(c)}/L_{b(c)}$ postupně pro nosník s indexem b a pro sloup s indexem c)

Styčnický rámů, pro které platí, že $k_b/k_c < 0,1$ by měly být klasifikovány jako polotuhé.

Polotuhý styčník

Polotuhý styčník nesplňuje kritéria pro tuhý nebo kloubový přípoj. Zároveň norma udává, že se k tuhým a kloubovým styčnickům může při návrhu přistupovat jako k polotuhým.

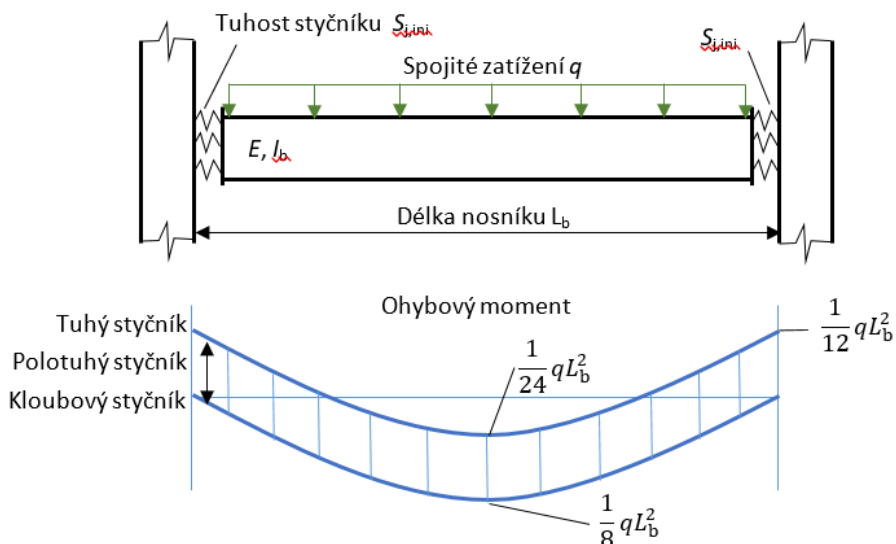


Obr. 12: Grafická klasifikace styčnicků $S_{j,ini}$, 1-tuhý styčník, 2-polotuhý, 3-kloubový

(EN 1993-1-8, 2005)

Klasifikace styčnicků podle tuhosti nezáleží pouze na parametrech samotného styčnicku, ale rozhodují také průřezové charakteristiky a délky připojovaných prvků. Příkladem může být styčník, který je pro ohybově tuhý sloup a netuhý nosník klasifikován jako tuhý a zároveň při opačné konfiguraci, tedy při tuhém nosníku a netuhém sloupu, jako polotuhý.

Vliv tuhosti styčníku lze zkoumat na nosníku zatíženém spojitým zatížením q , délkou L_b , s momentem setrvačnosti I_b a modulem pružnosti materiálu E . Nosník je pro zjednodušení připojen na nekonečně tuhé sloupy. Vliv tuhosti na průběh ohybového momentu je znázorněn na obr. 13. (Šabatka a kol.,2017)



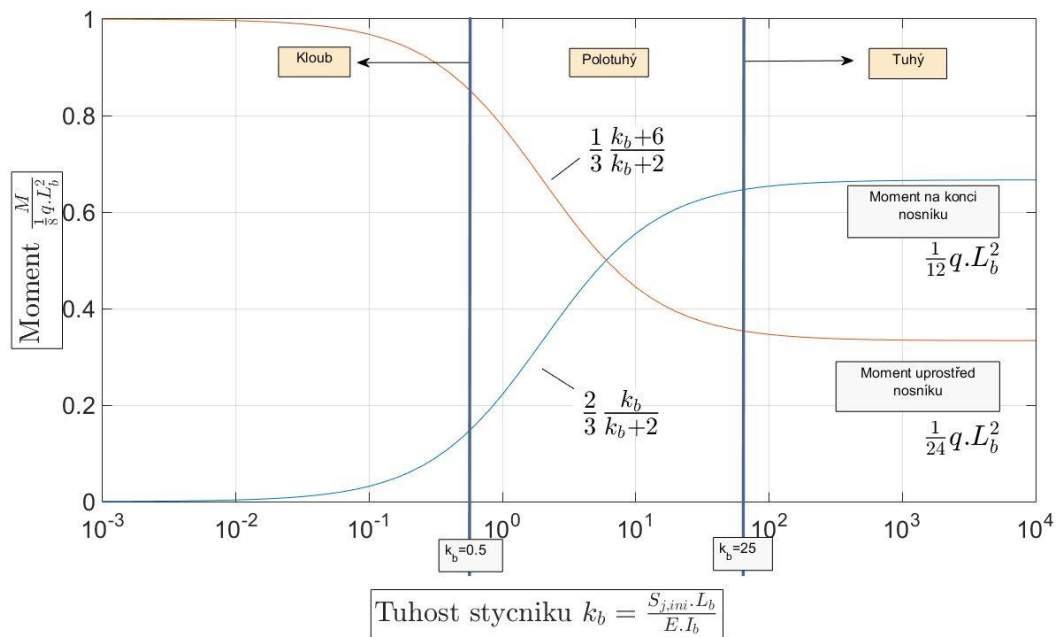
Obr. 13: Vliv tuhosti připojení na průběh ohybového momentu (Šabatka a kol.,2017)

Bezrozměrná tuhost k_b vychází ze vztahu (4) a je definována jako

$$k_b = \frac{S_{j,ini} \cdot L_b}{I_b \cdot E} \quad (5)$$

Grafické zobrazení vlivu bezrozměrné tuhosti k_b na moment na konci a uprostřed nosníku je znázorněn na obr. 14.

V grafu jsou zvýrazněny tři oblasti klasifikace styčníků – kloubový, polotuhý a tuhý styčník. Tyto oblasti jsou omezeny podle normy (EN 1993-1-8, 2005) hodnotou bezrozměrné tuhosti 0,5 a 25. Z grafu je evidentní, že největší význam a vliv tuhosti styčníku na hodnoty ohybového momentu na konci a uprostřed nosníku je v oblasti polotuhého styčníku. V případě polotuhého styčníku je výsledná tuhost zásadní při analýze konstrukce. Naopak pro kloubové a tuhé styčníky není přesné stanovení hodnoty tuhosti důležité.



Obr. 14: Vliv bezrozměrné tuhosti k_b na moment na konci a uprostřed styčnicku (Šabatka a kol., 2017)

2.5.2 Klasifikace podle únosnosti

Klasifikace styčnicků podle únosnosti spočívá podle normy (EN 1993-1-8, 2005) v porovnávání momentové únosnosti styčnicku $M_{j,Rd}$ s návrhovými momentovými únosnostmi připojovaných prvků – $M_{b,Rd}$ pro nosník a $M_{c,Rd}$ pro sloup.

Norma rozlišuje tři základní typy přípojí – kloubový, s částečnou únosností a s plnou únosností.

Kloubový styčnick (podle únosnosti)

Je takový styčnick, jehož momentová únosnost $M_{j,Rd}$ nepřekračuje 0,25 násobek návrhového momentu přípoje s plnou únosností.

Styčnick s plnou únosností

Styčnick s plnou únosností splňuje kritérium, že jeho návrhový moment $M_{j,Rd}$ není menší než návrhový moment připojovaných prvků. Norma rozlišuje dva typy připojení, viz obr. 15.



Obr. 15: Typy připojení: a) vrchol sloupu

b) ve výšce sloupu

Styčnick je klasifikován jako přípoj s plnou únosností, když pro případ napojení ve vrcholu sloupu platí, že $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ nebo $M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}$, kde pravé strany nerovnice znamenají v pořadí momentovou plastickou únosnost pro nosník a momentovou plastickou únosnost pro sloup. Styčnick s plnou únosností tedy není slabým místem konstrukce. Ke kolapsu by došlo překročením únosnosti jednoho z připojovaných prvků.

V případě připojení ve výšce sloupu je jako přípoj s plnou únosností klasifikován ten, který splňuje $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ nebo $M_{j,Rd} \geq 2M_{c,pl,Rd}$.

Styčnick s částečnou únosností

Styčnick, který nesplňuje kritéria kloubového, ani styčnicku s plnou únosností, je klasifikován jako přípoj s částečnou únosností.

3 Postup návrhu styčnicků

K návrhu přípojů prutových konstrukcí může být přistupováno několika způsoby. O postupu návrhu může rozhodnout například složitost výpočetního modelu, podrobnost technické dokumentace, dostupnost výstupů experimentu, zkušenost projektanta nebo softwarová vybavenost.

V následujících bodech (Bajer, 2005) jsou uvedeny příklady postupů návrhu a způsoby implementace vlastností styčnicku do modelu konstrukce:

a) Ignorování rotační tuhosti přípoje a použití ideálních modelů styčnicku-dokonale tuhé vetknutí nebo ideální kloub. Tyto modely jsou v podstatě osami x a y v grafu vyjadřující rotační tuhost styčnicku, viz obr. 12. Tento model je praktický z hlediska časové investice a díky své jednoduchosti lze i výsledky snadno kontrolovat. Nicméně jak již bylo zmíněno v úvodu práce, v mnoha případech nemusí model vystihovat přesné chování konstrukce.

b) Na základě předem stanovených dimenzí prutů konstrukce, například postupem uvedený v bodě *a*), navrhnout parametry styčnicku. Pro takto stanovený přípoj výpočtem určit rotační tuhost styčnicku. S touto hodnotou potom dále uvažovat při statickém posouzení předběžně navržené konstrukce. Postup vyžaduje přesné specifikování parametrů styčnicku a může tedy být časově a softwarově náročný, ale při optimalizování a přesné analýze chování konstrukce je tento způsob nezbytný. K posouzení a stanovení chování přípoje může být použit například software IDEA StatiCa.

c) Na konstrukčně komplikovaném styčnicku, jehož model by byl kvůli složitosti nedůvěryhodný nebo by nevystihl skutečné chování přípoje, může být proveden experiment a na základě jeho výstupů jsou stanoveny vstupní parametry do reálného statického modelu. Tento přístup může mít vysoké nároky na financování zkušebních prostor, ale zároveň vysokou spolehlivost výstupů.

d) Řešení konstrukce jako celku vhodným softwarem (například Ansys) metodou konečných prvků. Konstrukce výpočetně nerozděluje na pruty a styčnický, ale software pracuje s přesně definovanými vlastnostmi prvků a vliv tuhosti styčnicků uváží ve výpočtu. Nevýhodou jsou vysoké nároky na výpočetní techniku, pořizovací náklady softwaru, přesné stanovení parametrů modelu a čas výpočtu.

4 Sekundární montované konstrukce

Požadavky na ocelové sekundární systémové konstrukce jsou především povrchová úprava, rychlost a jednoduchost montáže a variabilita využití v praxi. Požadavky ovlivňují velikost a tvar průřezů, prvky konstrukcí a styčnicků. Využívají se především za studena tvarované průřezy s perforací a styčníky umožňující snadnou a rychlou montáž, kotvení na stěny a strop, samostatně stojící konstrukce i konzolové řešení. Ve většině případů se jedná o systémové šroubované konstrukce, které využívají unikátní jednoúčelové tvary šroubů, podložek, matic, čelních desek a přeplátovaných spojů. Příklad sekundární konstrukce je na obr. 16.

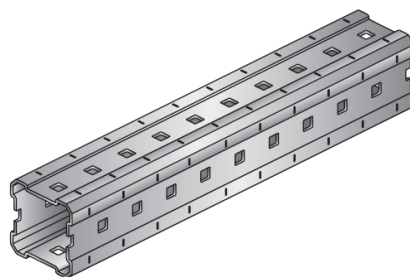


Obr. 16: Příklad sekundární konstrukce (Hilti, 2018)

4.1 Zkoumaný styčnick

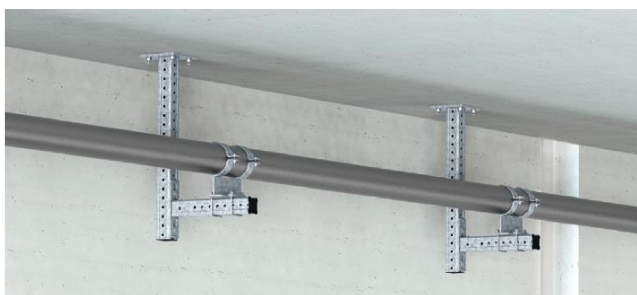
4.1.1 Nosný systém

Nosné prvky konstrukce jsou navrženy z uzavřeného perforovaného profilu čtvercového průřezu třídy 3, vyrobeného z oceli S235. Proti korozi je profil chráněn žárově zinkovanou povrchovou úpravou. Nosný stavebnicový systém se používá na technologické konstrukce například pro upevnění potrubních rozvodů, kabelových tras a systémů technických zatížení budov. Nosný prvek systému je znázorněn na obr. 17.



Obr. 17: Profil MI-90 (Hilti ČR, s.r.o., 2016)

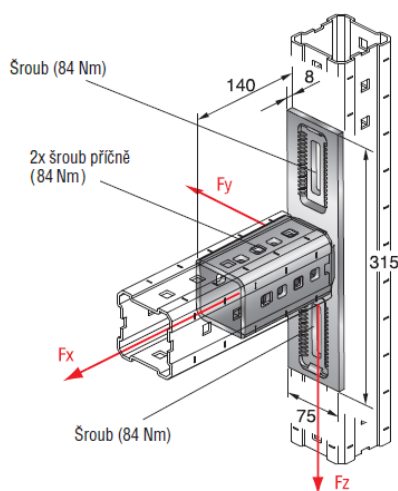
Příklad použití nosného systému, kde jsou prvky navrženy jako konzoly, je znázorněn na obr. 18.



Obr. 18: Příklad podpěrné systémové konstrukce tvaru dvojité konzoly (Hilti ČR, s.r.o., 2016)

4.1.2 Přípoj

Analyzovaný přípoj sestává ze styčnickového prvku, který připojuje vodorovný nosník na sloup ze stejného profilu, viz obr. 19 a z příslušenství.



Obr. 19: Schéma napojení profilu přípoje (Hilti ČR, s.r.o., 2016)

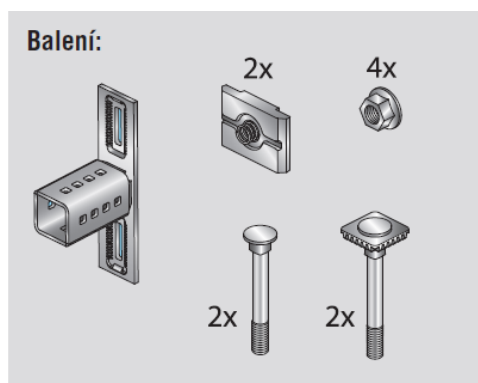
Styčnickový prvek se skládá ze dvou částí. Perforovaný profil uzavřeného průřezu o tloušťce plechu 6 mm se vsune do připojovaného vodorovného nosníku. Perforace plechu spojky je pozicí a velikostí stejná jako perforace profilu nosníku, tedy při překrytí je možné protáhnout otvorem v nosníku a zároveň plechem spojky šroub.

Na profil je přivařena čelní deska, která dolehne na svislý sloupek konstrukce. Perforace čelní desky je jiná než u profilu. Je opatřena dvěma obdélníkovými otvory o rozměrech 14 x 65 mm, do kterých se vsune dvojice dlouhých šroubů s integrovanou čtvercovou ozubenou hlavou. Otvory na přípoji jsou po delších stranách doplněny o zoubky, které pasují do ozubených hlav šroubů. Šrouby tedy zapadnou do tvarového zámku přípoje a dojde k lepšímu přenášení smykových sil. Tento způsob přípoje také umožňuje výškovou rektifikaci při montáži.

Dřík šroubu má závit jen do poloviny. Pod hlavou má šroub čtvercový průřez, který zapadne do perforace nosníku a vzpříčí se v otvoru. Hlava šroubu se při utahování neprotáčí a není potřeba při utahování používat druhý klíč. Řešení lépe přenáší smykové vnitřní síly, protože je šroub rychleji aktivován. Šrouby se vyrábí z oceli pevnostní třídy 8.8.

Balení je doplněno o masivní plechy, které se umístí na zadní stranu sloupku. Slouží jako podložky pro šroub namáhaný v tahu. Plech roznáší síly z hlavy šroubu do stojin uzavřeného čtvercového profilu sloupku. Při použití běžných podložek by vlivem osamělé síly od šroubu došlo k nadměrnému průhybu pásnice sloupku. Součástí plechu je pružina, která působí proti utahované matici a zajišťuje tak matici proti uvolnění.

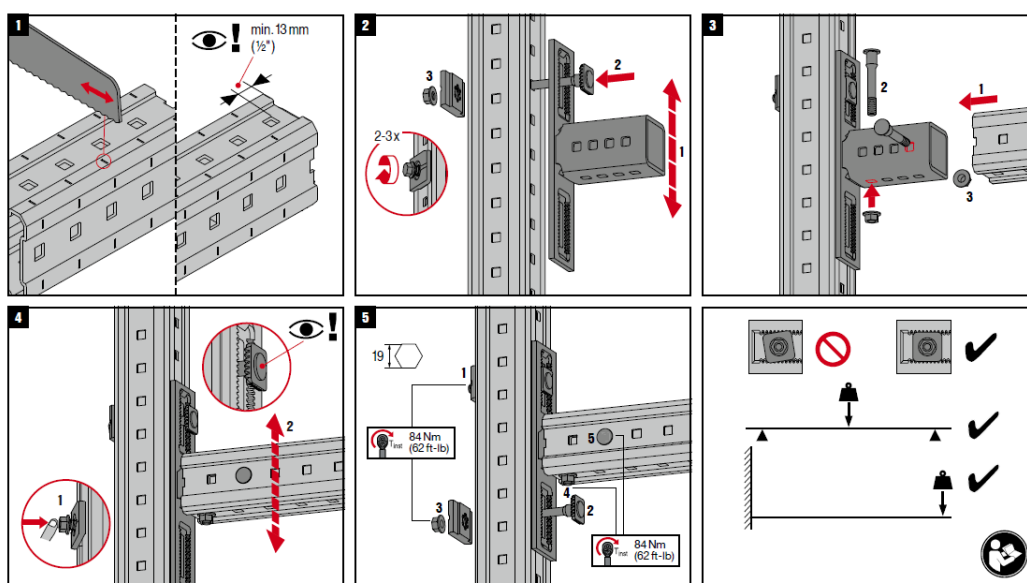
Matice jsou speciální šestihřanné se zdrsňenou plochou proti vibracím. Utahují se na sucho bez použití dalšího maziva. Příslušenství je znázorněno na obr. 20.



Obr. 20: Spojovací prvky (Hilti ČR, s.r.o., 2016)

4.1.3 Postup montáže přípoje

Podle postupu montáže, který udává výrobce, se v prvním kroku nařežou vhodné délky sloupku a připojovaného nosníku. V druhém kroku se vrchním otvorem ve spojce a perforaci sloupku protáhne dlouhý šroub s integrovanou čtvercovou ozubenou hlavou a z opačné strany sloupku se zajistí masivním plechem a šestihrannou maticí. Když ozubená část šroubu dosedne na stejně profilovanou část, dojde k fixaci styčnicku. Matici stačí v prvním kroku pouze několika otáčkami zajistit, k úplnému dotažení dojde až v dalších krocích. V následující fázi se nasune vodorovný nosník na uzavřený profil přípoje a zajistí se dvojicí šroubů ve dvou na sobě kolmých rovinách. Tato dvojice šroubů se utáhne již na předepsaný utahovací moment. Po zafixování nosníku dovoluje přípoj ještě výškovou rektifikaci v jednotkách centimetrů. V dalším kroku se horní šroub dotáhne opět na předepsaný moment a přípoj je zajištěný ve všech směrech. Poslední šroub s ozubením se vloží do spodního otvoru spojky a perforaci nosníku. Dotáhne se stejně jako horní. Grafický postup montáže je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21: Postup montáže spojky MIC-90-L (Hilti ČR, s.r.o., 2016)

Otvory ve spojce jsou v takovém rozměru, aby se v každé poloze kryly minimálně s jedním otvorem perforace sloupku. Tento fakt umožňuje připojení vodorovného nosníku v libovolné výšce sloupku bez závislosti na poloze otvorů. Tato vlastnost je praktická pro montážníka, ale ze statického hlediska má velký dopad na chování přípoje.

Přípoj ohybovému momentu vyvolanému externím zatížením odolává dvojicí sil ve šroubech na rameni osových vzdáleností šroubů, respektive na rameni síly v taženém šroubu a výslednice tlakového působení spodní části plechu na stěnu sloupku. To znamená, že poloha především vrchního šroubu přímo ovlivňuje nejen sílu ve šroubu, ale také ohybové namáhání čelní desky přípoje. Platí, že čím dále od středu spojky umístíme šroub, tím větší bude rameno sil a tím pádem menší síla ve šroubu, ale zároveň větší šířka nekotveného plechu, který musí zatížení přenášet.

Pro různé polohy šroubů se chová přípoj různě tuze. Dvě krajní konfigurace šroubů jsou znázorněny na obr. 22. Pro experiment byla zvolena ta nejpříznivější varianta uspořádání šroubů, tedy horní šroub co možná nejbliže středu přípoje. Při tomto uspořádání je přípoj ohybově nejtuzší. Ohýbaný styčný plech je totiž nejslabší komponentou přípoje. Tento fakt je blíže popsán v kapitole 5.1.2.



Obr. 22: Různé konfigurace šroubů přípoje

Pro experiment byla zvolena ta nejtuzší varianta konfigurace šroubů z důvodu omezené citlivosti zatěžovacích strojů v laboratoři. Únosnost tohoto systému se pohybuje v řádech jednotek kilonewtonů. Zařízení v laboratoři jsou ale běžně používané pro síly v řádech desítek až stovek kilonewtonů a v menších hodnotách můžou být značně nepřesné. Pro maximální eliminování nepřesností musel být přípoj namontován co možná nejtuzší.

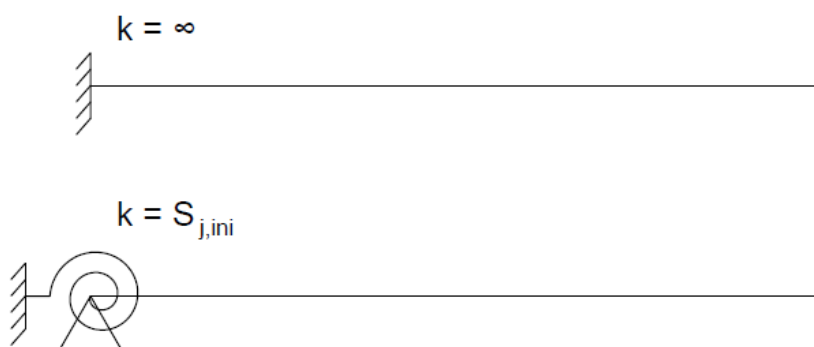
Výrobce upozorňuje na některá možná úskalí montáže. Nesprávné dodržení montážních kroků, nedohlédnutí na správné dosednutí všech částí styčnicku nebo

šrouby dotažené nesprávným utahovacím momentem mohou mít za následek neočekávané chování přípoje při zatěžování.

Utahovací moment je jedním z nejdůležitějších kroků při montování. Výrobce udává přesnou hodnotu utahovacího momentu – 84 Nm. Při utahování šroubů menším momentem nedojde k dolehnutí a spolupůsobení plechů především v části, kde se sloupek nasazuje na uzavřený profil spojky, nosník není správně upevněn. K přesné hodnotě utahovacího momentu lze dosáhnout použitím momentového utahováku.

4.1.4 Statické schéma a působení konstrukce

Výrobce udává, že tento přípoj může být navrhován jako konzolový. Teoretický model je konzola s nekonečně tuhým vetknutím. Ve skutečnosti, ale bude podepření působit určitou konečnou ohybovou tuhostí. Ta se při počátečním zatěžování bude rovnat počáteční rotační tuhosti styčnicku $S_{j,ini}$. Grafické znázornění teoretického a skutečného podepření je vyzobrazeno na obr. 23.



Obr. 23: Teoretický a skutečný model konzoly se zkoumaným styčnickem

Jedná se o montovanou konstrukci, kde jsou spoje provedeny systémem matic a závitů. Typické pro tyto spojení jsou počáteční prokluzy nebo neúčinnost šroubů a matic, kdy konstrukce nejdříve působí jako méně tuhá před tím, než vyvolané deformace způsobí aktivaci všech spojovacích komponent. Jde například o dolehnutí dřívku šroubu na stěnu otvoru nosníku.

Moderní softwary využívající metodu konečných prvků pro výpočet tuhosti styčnicků dokáží stanovit tuhosti jednotlivých prvků a přesně tak určit rotační tuhost přípoje bez ohledu na spolupůsobení s dalšími prvky konstrukce. To při experimentu není možné. Zatížení vyvolané poklesem válce přenáší konstrukce jako celek. Přesto

byla navržena tak, aby k deformacím docházelo především v přípoji vykonzolované části a sloupku. Tuhost konstrukce jako celku ale nelze zcela omezit na tuhost spojky samotné.

Další prvky sestavy, které ovlivňují celkové statické chování konstrukce jsou například následující komponenty. Vykonzolovaný nosník je na poměrně velkém rameni 450 mm ohýbán. Vzhledem k zatížení od válce, rameni působící síly a průřezovým charakteristikám profilu nemůže být tento nosník charakterizován jako ohybově tuhý, a proto ovlivní výsledný graf pracovního diagramu styčnicku. Podobným způsobem ovlivní výsledek sloupek konstrukce, který je navržen ze stejného průřezu, jako vodorovný zatěžovaný nosník. Kromě ohybového momentu, část sloupku přenáší i tlakovou sílu, která je přes šrouby přenesena do vsunuté patky. Toto spojení také není považováno za tuhé a sednutí a aktivace šroubů mohou v počátcích zatěžování mít také svůj vliv na výsledek experimentu. Vodorovné roznášecí nosníky, které přenáší reakce na sloup jsou výrazně ohybově tužší kvůli menšímu rozponu podpor, ale jejich příspěvek k celkovému chování není zanedbatelný.

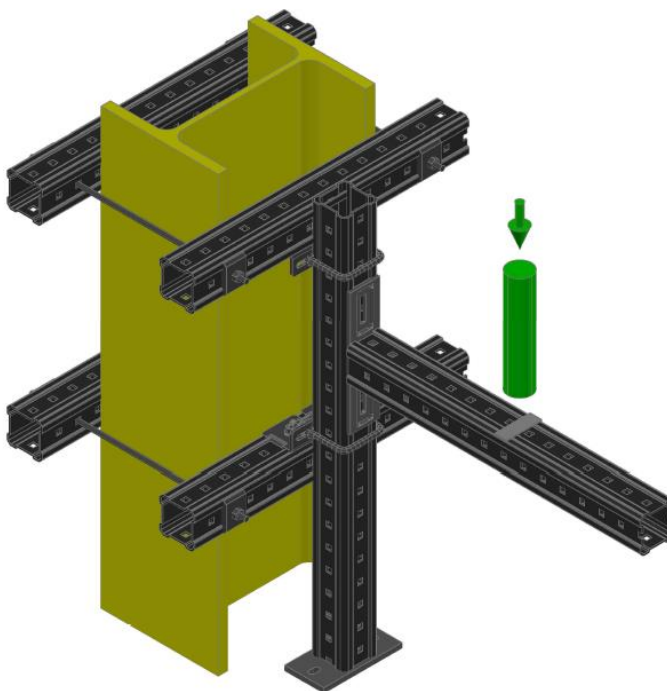
5 Stanovení ohybové tuhosti styčnicku

5.1 Experiment

5.1.1 Návrh sestavy konstrukce

Návrh konstrukce byl limitován možnostmi zkušební laboratoře. Pro co možná nejpřesnější výsledky bylo nutné navrhnout sestavu, která by měla svislý prvek ohybově tuhý, který by svou ohybovou tuhostí nijak výrazně neovlivňoval ohybovou tuhost přípoje. Tomuto případu by odpovídal přivařený svislý prvek na jeden z rámců podpůrné konstrukce zatěžovacího lisu. Svařování by výrazně zasáhlo do zařízení laboratoře. S ohledem na tento fakt byla navržena konstrukce na obr. 24. Grafický výstup je ze softwaru AutoCad 2018 3D.

Zatěžovací válec působí na rameni 450 mm od osy svislého prvku a působí na ocelové roznášecí destičce o rozměrech 90 x 30 mm. Takto působící síla reprezentuje bodové zatížení a vyvolává vnitřní síly na konstrukci, které jsou přenášeny následujícím způsobem:



Obr. 24: Schéma testované konstrukce

Normálová síla je ve styčnicku v rovnováze s posouvající silou a přes sloupek přenesena do patky konstrukce a dále do paty ocelového sloupu zkušebního rámu (na obr. 24 žlutý H profil). Kvůli působení prostého tlaku nebylo zkoušenou konstrukci nutné k podkladu nijak kotvit a spoj je vyřešený položením patky na podklad.

Posouvající síla je přes nosník přenášena přípojovacími šrouby na svislý sloupek. Způsob přenášení síly šrouby ze spojky na sloupek je popsáno v další kapitole.

Ohybový moment je díky ohybové tuhosti styčnicku přenášen na svislý sloupek, který je zajištěn dvojicí masivních třmenů nad a pod přípojem. Třmeny připojují sloupek se styčnickem na dvojici vodorovných nosníků. Vzdálenost těchto nosníků je zároveň rameno tahové a tlakové síly, které vyrovnává ohybový moment způsobený externím zatížením od lisu. Přenos tahové síly přenáší třmen nad přípojem, zatímco tlakovou sílu přenáší vodorovný nosník pod styčnickem. Spodní třmen je tedy spíše konstrukční prvek, který není významně namáhán. Vodorovné roznášecí nosníky jsou ke zkušebnímu rámu připevněny závitovými tyčemi a staženy k další dvojici profilů z opačné strany sloupu.

Při návrhu bylo nutné najít vhodnou kombinaci vzdálenosti vodorovných roznášecích nosníků. Platí, že čím větší vzdálenost, tím větší rameno sil a menší síly do roznášecích prvků, ale zároveň také větší ohybové namáhání sloupku, který svojí ohybovou tuhostí může ovlivnit zkoumanou tuhost přípoje, což je v tomto experimentu nežádoucí.

5.1.2 Předpokládané porušení

Předpokládané porušení konstrukce nastane kvůli překročení únosnosti přípoje. K tomu může dojít na pěti různých místech, kdy selže jeden z konstrukčních prvků spojky, a to styčný plech přiložený ke sloupku, plech nasunuté části do nosníku, svary plechu, šrouby v nasunuté části spojky nebo šrouby připojující spojku ke sloupku.

Únosnost a tuhost styčného plechu, který bude namáhán kombinací ohybového a smykového namáhání jsou, jak bylo popsáno v kapitole 4.1.3, závislé především na pozici šroubů. Ohybovému namáhání, které musí plech na rameni sil mezi šrouby a středem tlaku přenášet, přispívá profilace a tloušťka plechu. V této oblasti je ale plech

uprostřed kvůli rektifikaci a jednoduchosti montáže perforován, a tím i značně oslaben. Ohybové namáhání je tedy přenášeno pouze dvěma pásy plechu tloušťky 8 mm. Plech není dále nijak vyztužen nebo profilován, proto lze předpokládat, že k porušení dojde právě v tomto místě. Styčný plech je také výrobcem označen jako nejslabší komponenta přípoje.

Vzhledem k tloušťce a působení části plechu vsunutého do nosníku nebude svojí únosností ani tuhostí při daném zatěžování v experimentu významný. Pro tento spoj jsou použity šrouby s kulatým dříkem zakončeným závity a čtvercovým kusem pod hlavou, který se zasune do perforace nosníku. Význam tohoto tvaru byl popsán v kapitole 4.1.2. Specifický tvar šroubu má za následek, že šroub při deformaci doléhá na jedné straně nosníku a přípoje čtvercovým průřezem a na druhé straně kulatým. Výsledkem je nerovnoměrné rozložení napětí. Čtvercová část lépe vyplní otvor a bude přenášet více zatížení. Na druhé straně kulatý dřík v hranatém otvoru způsobí velké napětí na styku. Je evidentní, že i v tomto případě dal výrobce přednost jednoduchosti montáže nad statickým působením, a že porušení v tomto prvku nebude rozhodující.

Svary použité na připojení styčného plechu a plechu vsunutého do nosníku budou podobně jako plech vystaveny smykovému a ohybovému namáhání. Jedná se o čtveřici masivních koutových svarů vedených po stranách plechu čtvercového profilu. Podle výrobce není svar slabým místem přípoje a nebude ani místem porušení v experimentu.

V přípoji jsou použity šrouby velikosti M12 oceli třídy 8.8. Působení šroubů ve vsunuté části již bylo popsáno v předchozích odstavcích. Šrouby, které připojují přes ocelovou smykovou destičku spojku ke sloupku konstrukce, jsou ze stejného materiálu a průřezu. Při očekávané únosnosti spojky vychází šrouby takové pevnosti materiálu a velikosti průřezu velmi předimenzované, nicméně důvodem této velikosti šroubů je opět jednoduchost a rychlost montáže.

5.1.3 Průběh experimentu

Byl zvolen statický způsob zatěžování vzorku, a to kvůli přiblížení se ke skutečnému působení v reálných konstrukcích. Statickému chování odpovídá minimální změna zatížení v čase, která je ale během experimentu nereálná. Proto byla zatěžovací zkouška realizována jako řízená deformací, tedy konstantním přírůstkem deformace v čase. Velikost bodového zatížení vyvolaná válcem na konstantním

rameni byla regulována přírůstkem svislé deformace při poklesu válce. Hodnota přírůstku poklesu válce byla nastavena na 2 mm za minutu. Zkouška trvala přibližně 40 min. Na obr. 25 je zobrazena sestavená konstrukce před zahájením zkoušky.



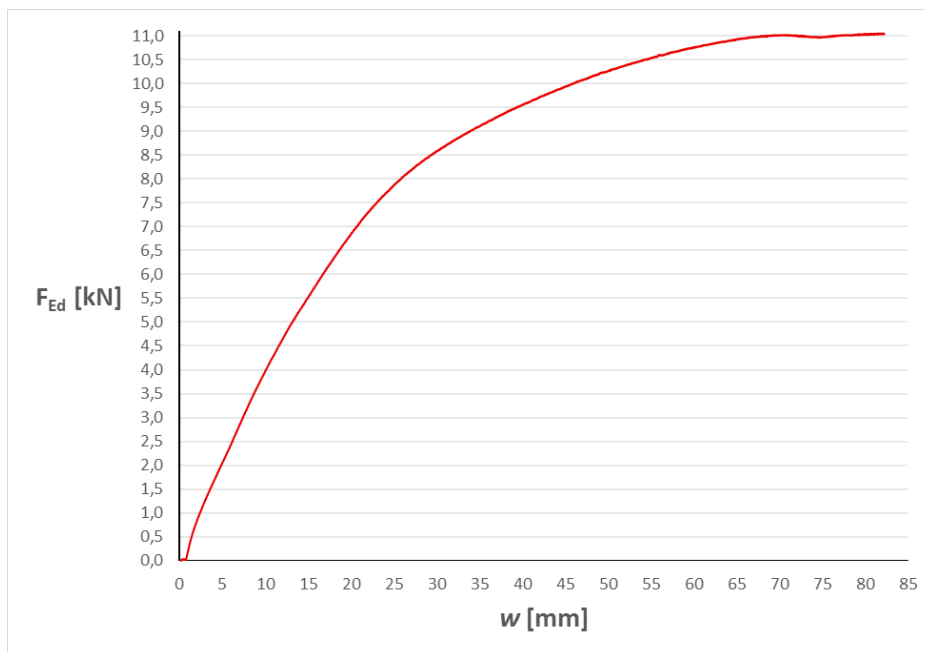
Obr. 25: Začátek experimentu, konstrukce před zatížením

Výstup z laboratorních přístrojů byla datová tabulka programu Microsoft Excel s přibližně třiceti tisíci řádky dat. Každou desetinu sekundy snímá zatěžovací válec polohu vůči svému počátečnímu stavu a tomu odpovídající reakci, kterou působí zatěžovací předmět proti válci. Datová tabulka obsahuje tedy informace o čase, deformaci válce a okamžité hodnotě zatížení.

V kapitole 4.1.4 je uvedeno, že u montovaných konstrukcí je typický počáteční prokluz způsobený výrobními a montážními tolerancemi. Z tohoto důvodu bylo před experimentem zvažováno, zda by se neměla konstrukce nejdříve zatížit malým zatížením a následným odtižením pro aktivování částí, které se podílí na přenášení zatížení. Tím by došlo k eliminování prokluzu. Pro lepší vystižení skutečného chování reálných konstrukcí, kdy se ve většině případech namontovaná konstrukce zatíží na charakteristické zatížení nebo jeho významnou část, nebylo aktivační zatížení aplikováno.

5.1.4 Výstupy experimentu

Na obr. 26 je zobrazen průběh výstupních hodnot experimentu, kde na vodorovné ose je znázorněn svislý posun válce a na svislé ose zatěžovací síla. Z grafu lze vyčíst, že maximální svislá deformace na konci vykonzolované části byla přibližně 82 mm, maximální síla 11 kN a maximální pootočení ve styčnicku 0,18 rad. Odtížení konstrukce není na grafu zvýrazněno.



Obr. 26: Graf výstupních hodnot experimentu

V úplném počátku grafu je patrný pozvolný nárůst reakční síly, kdy se křivka přimyká k vodorovné ose. Tato část grafu se dá vysvětlit dvěma způsoby. Může se jednat o počáteční aktivaci šroubované konstrukce, která je, jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, typická nižší počáteční rotační tuhostí. V tomto případě by ale měla aktivační část delší průběh podobně jako u grafu na obr. 4. Dalším vysvětlením může být fakt, že při nastavení zatěžovacího válce před zkouškou byl válec posunut do polohy těsně nad roznášecí plech. Nastavení na těsný dotyk by totiž mohlo ovlivnit počátek grafu. Skutečnost, že mezi válcem a roznášecím plechem nebyl kontakt, potvrzují nulové počáteční síly. Hodnota, kde funkce nabírá strmější průběh, odpovídá posunu válce přibližně 1 mm.

V průběhu experimentu se při určité hodnotě ohybového momentu začal styčný plech v předpokládaném místě styčnicku deformovat. Při dalším zatížení se deformace, ale i reakční síla do válce, stále zvyšovaly až do chvíle, kdy bylo nutné zkoušku ukončit

z důvodu dosažení limitního natočení kloubové hlavice zatěžovacího válce a maximálního vysunutí válce. Ukončení zatěžovacího testu tedy nebylo vynuceno kolapsem konstrukce ani žádné její části viz obr. 27. Po odtížení došlo k malému návratu nejen plechu, ale i ostatních částí konstrukce.



Obr. 27: Styčník před ukončením zkoušky

Po rozebrání konstrukce a důsledné kontrole komponent byl jako jediným deformovaným prvkem právě styčný plech přípoje. Všechny komponenty spojky i ostatní konstrukční části zůstaly nepoškozeny. Deformovaná spojka je zobrazena na obr. 28.

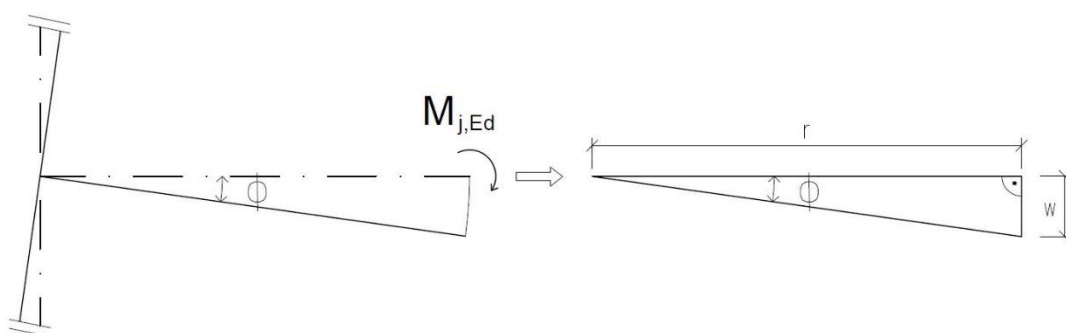


Obr. 28: Pohled na přípoj po ukončení experimentu

Zkouška byla díky očekávanému průběhu a výsledkům sledána jako úspěšná.

5.1.5 Pracovní diagram styčnicku

Na základě výstupních hodnot zobrazených v grafu na obr. 26 je možné sestavit pracovní diagram styčnicku. Pro sestavení tohoto grafu je nutné převést výstupní veličiny experimentu na veličiny pracovního diagramu - natočení a ohybový moment působící ve styčnicku. Po zjednodušení lze potřebné hodnoty spočítat pomocí goniometrické funkce. Do výpočtu je kvůli zjednodušení vnesena zanedbatelná chyba.



Obr. 29: Zjednodušení geometrie konstrukce

Ve skutečnosti se body střednice vykonzolované zatěžované části deformují po kružnici se středem v bodě průsečíku střednic prvků a poloměrem o velikosti vzdálenosti příslušného bodu k průsečíku střednic prvků. Zjednodušení spočívá v předpokladu, že k deformacím dochází kolmo na střednici v klidovém stavu. Na obr. 29 je znázorněno geometrické zjednodušení a pravoúhlý trojúhelník, který je tvořen

ramenem r k působišti síly, posunem válce w a spojnicí s průsečíkem střednic prvků. V takovémto trojúhelníku platí:

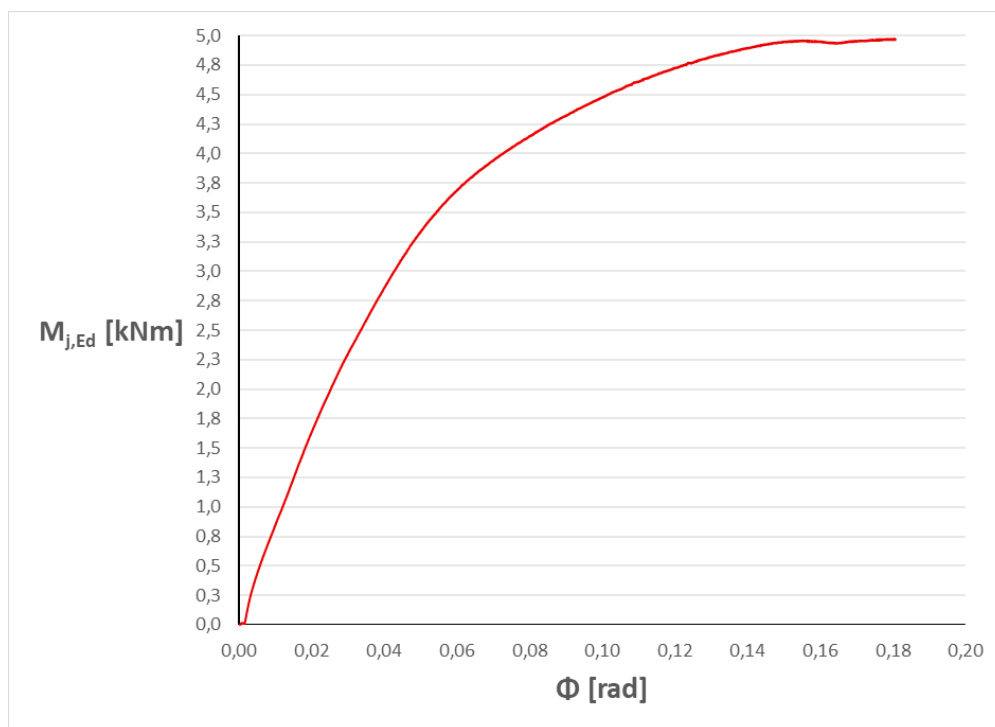
$$\Phi = \arctg\left(\frac{w}{r}\right) \quad (6)$$

kde Φ je pootočení, w je posun válce a r je rameno síly.

Ohybový moment působící ve styčnicku lze stanovit ze vztahu

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot r \quad (7)$$

Pracovní diagram zkoumaného styčnicku, kde na vodorovné ose je natočení a na svislé ose působící ohybový moment, ukazuje obr. 30.



Obr. 30: Pracovní diagram zkoumaného styčnicku

Graf nemá žádné větší nepravidelnosti, což potvrzuje, že zkoumaná konstrukce byla správně sestavena. Předepsané hodnoty utahovacího momentu a speciální tvary šroubů přispěly k minimálnímu vlivu komponent montované konstrukce na počáteční tuhost.

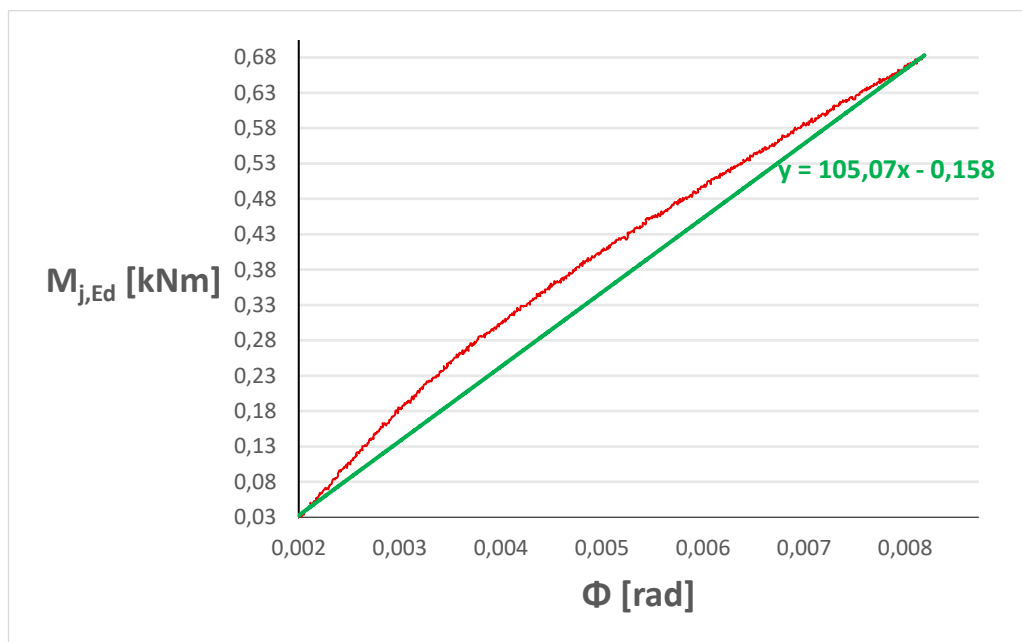
Z grafu je dále patrné, že styčnick je specifický svojí vysokou tažností. K této vlastnosti přispívají velkou částí ocelové komponenty a dále fakt, že k porušení styčnicku došlo v ohýbaném prvku styčnicku. Vysoká tažnost má za následek také vysokou rotační kapacitu styčnicku. Pro určení konkrétní hodnoty plastického mezního

natočení styčnicku by byla potřebná další část grafu a hodnota natočení, kdy M_j klesne při dalším zatěžování na hodnotu $M_{j,Rd}$. Pro získání těchto hodnot ale nebylo testovací zařízení uzpůsobené.

5.1.6 Ohybová tuhost styčnicku

Podle kapitoly 2.2 je při analýze konstrukce pružnou globální analýzou do hodnoty zatížení $M_{j,Ed}$, která je menší než $2/3 M_{j,Rd}$ počáteční rotační tuhost styčnicku uvažována jako $S_{j,ini}$.

Únosnost styčnicku, která je dána nejslabší komponentou přípoje při ohybovém namáhání je podle výrobce 1,02 kNm. Jedná se o návrhovou hodnotu únosnosti, která nemůže být s hodnotami experimentu porovnávána. Nicméně pro orientační stanovení počáteční rotační tuhosti je přibližná hodnota $2/3$ návrhového momentu dostačující. Pracovní diagram je tedy shora omezen na hodnotu 0,68 kNm. Zdola je omezen hodnotou, při níž se průběh funkce napřímil a všechny komponenty byly aktivovány. Spojnice prvního bodu grafu a hodnoty, které odpovídá $2/3 M_{j,Rd}$ je zobrazena na obr. 31.



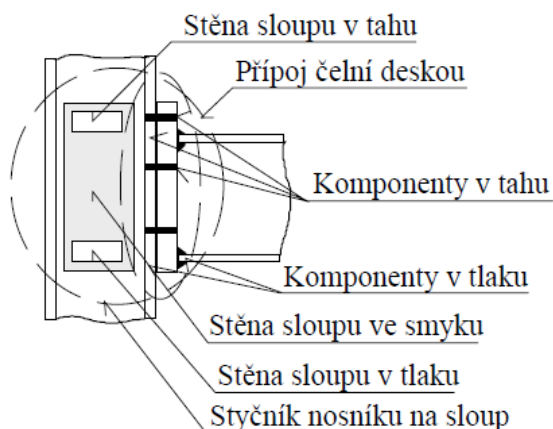
Obr. 31: Počáteční část křivky pracovního diagramu s doplněnou lineární funkcí

Funkční předpis lineární funkce je $y = 105,07x - 0,158$. Počáteční rotační tuhost styčnicku $S_{j,ini}$ odpovídá směrnicí této lineární funkce.

Z funkčního předpisu tedy vyplývá, že přibližná počáteční rotační tuhost přípoje je **105,07** kNm/rad.

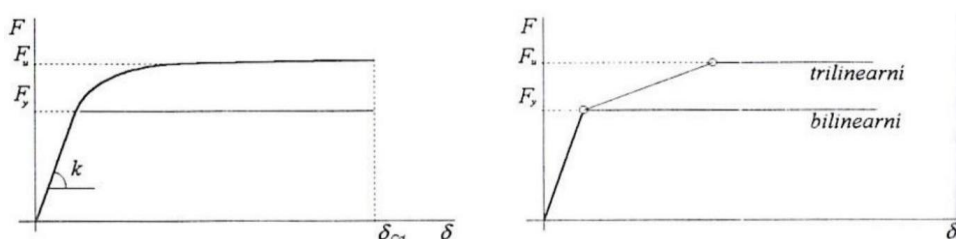
5.2 Výpočet metodou komponent

Princip metody komponent spočívá v diskretizaci styčnicku na jednotlivé komponenty a následné analýze každé komponenty s omezenou vzájemnou interakcí. Pro zjednodušení výpočtu se komponenty klasifikují podle převládajícího namáhání jako komponenty tažené, tlačené a namáhané smykem, podle chování jako tažné a křehké nebo podle tuhosti na tuhé, polotuhé a poddajné.



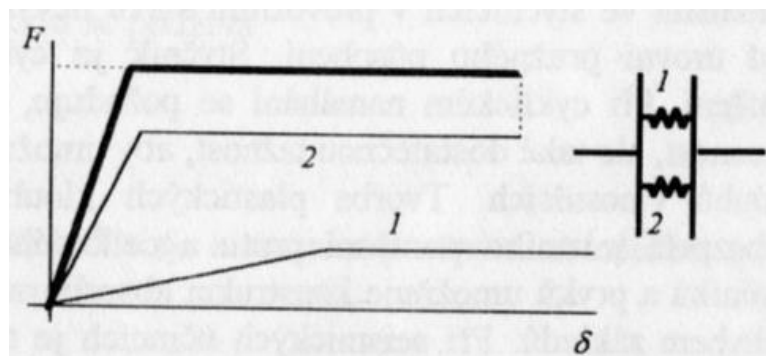
Obr. 32: Rozdělení styčnicku na komponenty (Wald, 2003)

Chování každé komponenty ve styčnicku lze vyjádřit obecným nelineárním průběhem závislosti deformace na síle. Pro zjednodušení se řešení linearizuje. Pružně-plastické chování bilineárním modelem, který popisuje počáteční tuhost k_i , únosnost F_i a tažnost komponentu δ_{sd} je zachyceno na obr. 33.



Obr. 33: Obecné a idealizované chování komponentu (Wald a Sokol, 1999)

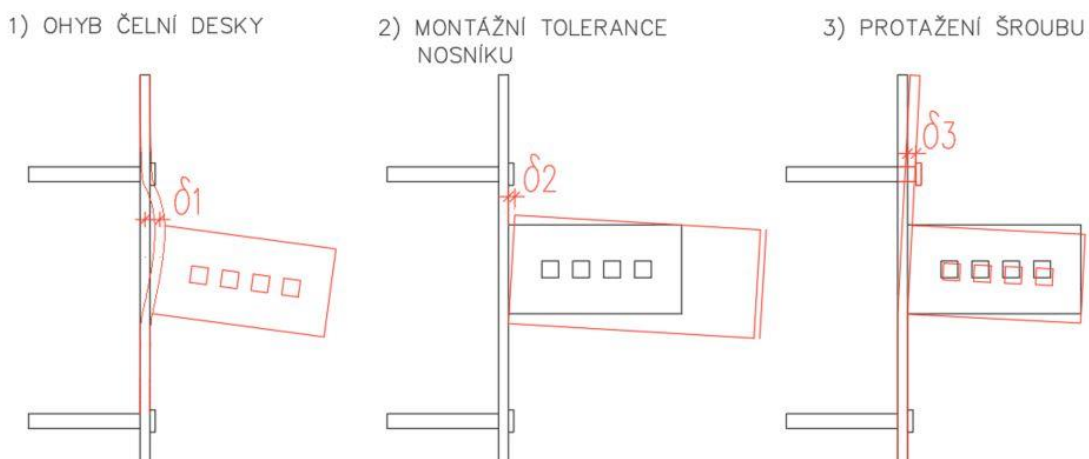
O přesnosti modelu rozhoduje kvalita popisu deformační tuhosti a únosnosti rozhodujících komponent a správný odhad ramen vnitřních sil ve styčnicku pro skládání jejich chování, viz obr. 34 v celkový průběh chování styčnicku, který se popisuje závislostí natočení na působícím ohybovém momentu ve styčnicku.



Obr. 34: Skládání komponent při paralelním působení (Wald a Sokol, 1999)

5.2.1 Postup výpočtu metodou komponent

Přípoj byl rozdělen na jednotlivé komponenty, které se při experimentu nejvíce deformovaly, viz obr. 35. Pro každou komponentu byla nezávisle na ostatních částech přípoje vypočtena deformace při působení jednotkového ohybového momentu.



Obr. 35: Rozdělení přípoje na komponenty a jejich deformace

Výpočet deformací komponent od jednotkového momentu lze rozdělit na následující tři části:

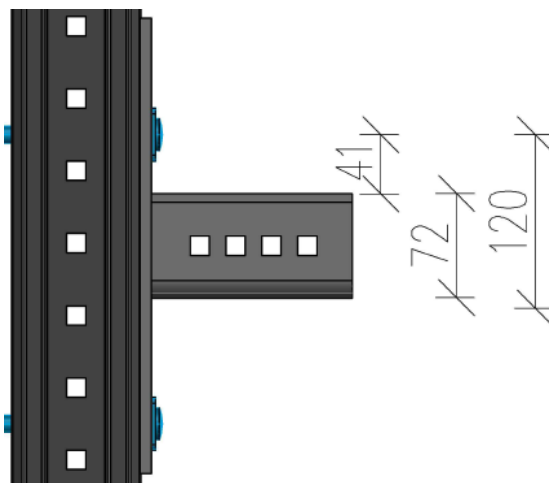
1) Deformace ohybem čelní desky

$$\delta_1 = \frac{F_{Ed} m^3}{3EI} = \frac{8333 \cdot 41^3}{3 \cdot 210000 \cdot 3200} = 0,285 \text{ mm} \quad (8)$$

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{1,0}{0,12} = 8,33 \text{ kN} \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{12} L_{eff} t^3 = \frac{1}{12} \cdot 75 \cdot 8^3 = 3200 \text{ mm}^4 \quad (10)$$

Geometrie přípoje je znázorněna na obr. 36. Šířka styčného plechu přípoje je 75 mm.



Obr. 36: Geometrie přípoje

2) Deformace vlivem montážních tolerancí

Vnitřní rozměr nosného profilu nasouvaného na plech přípoje je pro snadnou montáž o 1 mm větší. Za předpokladu, že po dotažení šroubů je vzdálenost mezi plechy profilu a spojky nahoře a dole 0,5 mm, z geometrie pootočení nosníku vyplývá, že vodorovnou deformaci δ_2 lze předpokládat jako 0,25 mm.

3) Deformace horního šroubu ve sloupku

$$\delta_3 = l_0 \varepsilon = 90 \cdot 0,00035 = 0,0316 \text{ mm} \quad (11)$$

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{1,0}{0,12} = 8,33 \text{ kN} \quad (12)$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{12^2}{4} = 113,1 \text{ mm}^2 \quad (13)$$

$$\sigma_x = \frac{F_{Ed}}{A} = \frac{8333}{113,1} = 73,68 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{73,68}{210000} = 0,00035 \quad (15)$$

Délka šroubu je 90 mm, průměr 12 mm.

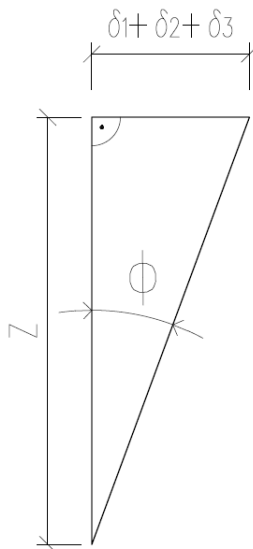
Deformace styčnicku od jednotkového momentu se získá z deformací komponent jako

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0,285 + 0,25 + 0,0316 = 0,567 \text{ mm} \quad (16)$$

Počáteční rotační tuhost $S_{j,ini}$ se stanoví podle obr. 37 pro natočení ϕ podle vztahu

$$\phi = \arctg \left(\frac{\delta}{z} \right) = \arctg \left(\frac{0,567}{72} \right) = 0,00787 \text{ rad} \quad (17)$$

$$S_{j,ini} = \frac{M_{Ed}}{\phi} = \frac{1,0}{0,00787} = \mathbf{127,1 \text{ kNm/rad}} \quad (18)$$



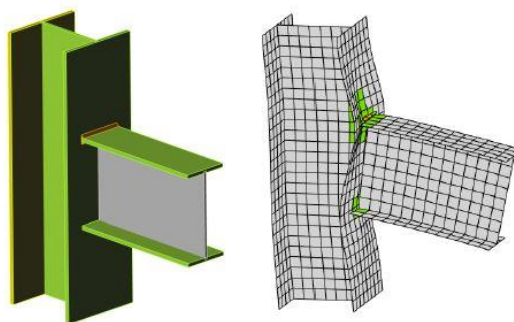
Obr. 37: Natočení přípoje

5.3 Analýza konečnými prvky s komponentami

Od osmdesátých let dvacátého století se metoda konečných prvků stala nedílnou součástí softwarů pro globální analýzu konstrukcí. Jedná se o přibližnou numerickou metodu, jejíž přesnost je závislá na počtu prvků ve výpočetních modelech. Následné navrhování a posuzování prvků vychází ze vztahů daných příslušnou národní normou. Podle (Šabatka a kol.,2017) bylo typické metodou konečných prvků analyzovat konstrukci jako celek a následně jednotlivé prvky navrhnout podle příslušných vzorců.

Pro výpočet byl použit software IDEASTatiCa, který využívá metodu konečných prvků (MKP) pro posuzování styčniců konstrukcí a prvků detailů. Jedná se o standardní metodu komponent, která používá vnitřní síly z MKP modelu k podrobnější analýze komponent přípoje. Nejprve je styčnic rozdělen na jednotlivé komponenty, tj. plechy, šrouby a svary použitím vhodných modelů prvků. Napětí a síly v komponentech jsou vypočteny podle metody konečných prvků a následuje posouzení podle daných vzorců normy obdobně jako při použití komponentní metody. Tato metoda se podle (IDEASTatiCa, 2017) jmenuje Component Based Finite Element Method, zkratkou CBFEM a může být přeložena jako metoda komponent založena na výpočtu konečných prvků. Ukázka analýzy styčnicu metodou CBFEM je znázorněna na obr. 38.

Ocelové plechy jsou modelovány pomocí stěno-deskových prvků, kdy každý plech má samostatnou výpočetní síť konečných prvků. Pro další komponenty byly vyvinuty speciální výpočetní modely. Svary jsou modelovány jako vazby mezi plechy. Šrouby jsou modelovány jako nelineární pružiny, které přenáší tah a smyk. Kontakty, jsou modelovány tak, aby přenášely pouze tlak, například v podélném napojení dvou pásnic tenkostěnných profilů. (IDEASTatiCa, 2017)

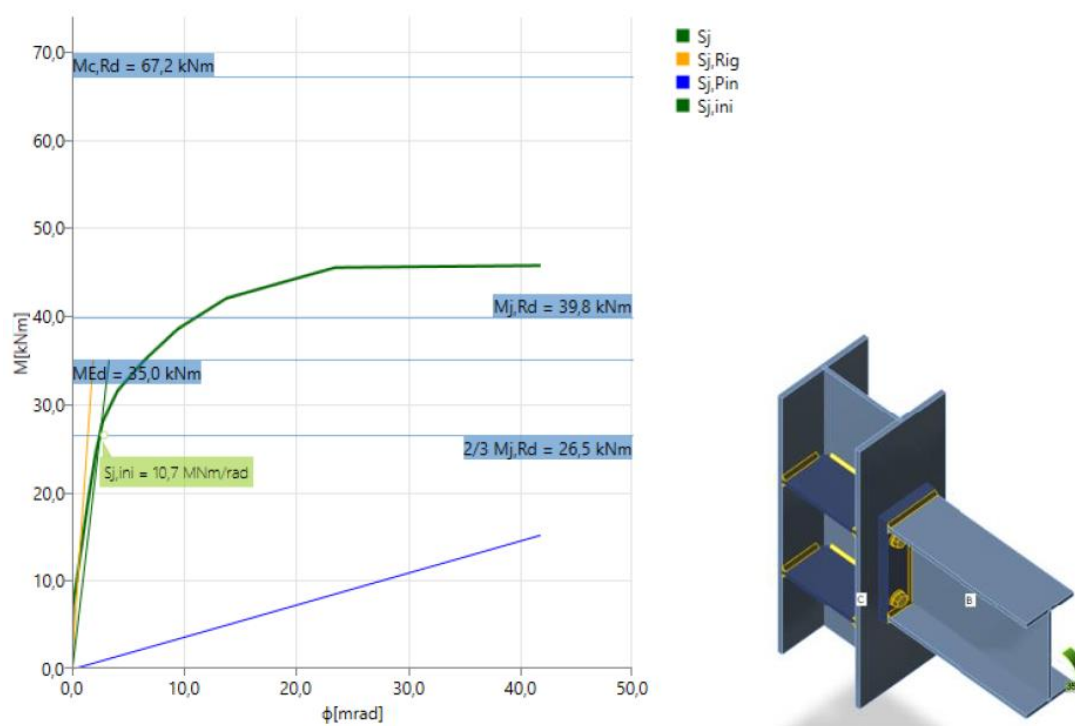


Obr. 38: Ukázka analýzy styčnicu pomocí softwaru IDEASTatiCa (IDEASTatiCa, 2017)

5.3.1 Výstupy softwaru IDEA StatiCa

Metoda výpočtu konečných prvků s komponentami (CBFEM) dokáže analyzovat průběh rotační tuhosti styčnicku na základě tuhostí jednotlivých komponent, kde každá má svůj zvláštní výpočetní model. Pro takto vymodelovaný přípoj nejsou na rozdíl od experimentu výsledné tuhosti komponent ovlivněny dalšími prvky styčnicku. V experimentální části, kdy konstrukce disponuje určitou tuhostí, nemůže být s jistotou určena tuhost jednotlivých komponent.

Na obr. 39 je znázorněn výstup analýzy tuhosti – tuhostní diagram (pracovní diagram styčnicku). V něm jsou zvýrazněny důležité hodnoty potřebné k určení počáteční rotační tuhosti a dalších parametrů, podle kterých je následně styčnick klasifikován podle normy stejně, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.



Obr. 39: Výstup tuhostní analýzy styčnicku v softwaru IDEA StatiCa (IDEA StatiCa, 2017)

V diagramu na obr. 39 je graficky znázorněno několik parametrů styčnicku. Tmavě zelenou barvou a popiskem S_j je vyjádřen průběh rotační tuhosti. Hodnotou $2/3 M_{j,Rd}$ je tento průběh omezen pro určení počáteční rotační tuhosti, na obrázku světlý odstín zelené. Dále je v grafu zvýrazněna návrhová ohybová únosnost styčnicku $M_{j,Rd}$ a sloupu $M_{c,Rd}$. V diagramu je také vyjádřen návrhový moment od předem definovaného zatížení. Všechny hodnoty jsou kromě grafického znázornění doplněny o číselnou

hodnotu. Uživatel si tedy snadno může ověřit, zda a s jakou rezervou je styčník vyhovující.

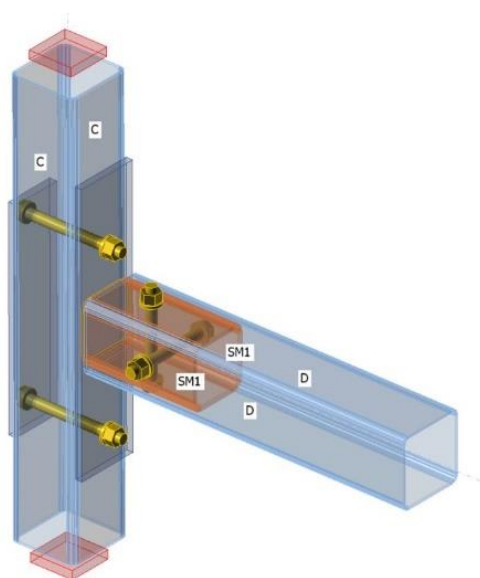
Žlutou a modrou barvou jsou označeny grafické rozhraní klasifikace styčníku podle tuhosti na základě předem nadefinované délky nosníku. Žluté barvě odpovídá strmější přímka ohraničující tuhý přípoj, modrou barvou kloubový přípoj.

Další parametry styčníku jako sečná rotační tuhost nebo rotační kapacita jsou také vypočítány a je možné je graficky zobrazit.

Očekávaná tuhost přípoje spočtena pomocí softwaru IDEASTatiCa je vyšší než stanovená experimentem. Důvodem je podílení se ostatních částí konstrukce na tuhosti styčníku v experimentu.

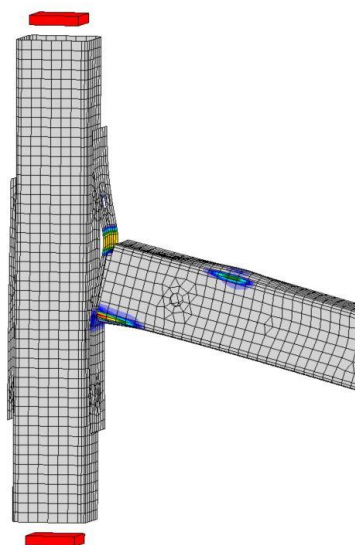
5.3.2 Výpočet konečnými prvky s komponentami

Na obr. 40 je znázorněn model styčníku v programu IDEASTatiCa. Sloupek je uložen a konzola je zatížena ohybovým momentem 2 kNm.



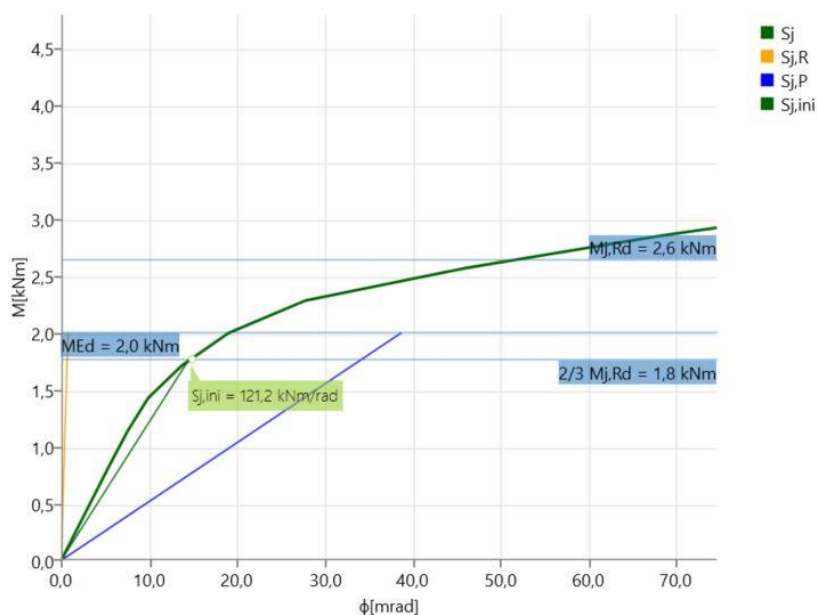
Obr. 40: Model přípoje v programu

Na obr. 41 je znázorněno plastické přetvoření deformovaného styčníku se zvýrazněnou sítí konečných prvků.



Obr. 41: Analýza plastického přetvoření styčnicku

Výstupem programu je závislost natočení na působícím ohybovém momentu viz obr. 42. Je zvládněna momentová únosnost styčnicku $M_{j,Rd}$ a počáteční rotační tuhost $S_{j,ini}$, která je určena pro $2/3 M_{j,Rd}$. Diagram zobrazuje klasifikaci styčnicku podle tuhosti. Tuhost styčnicku se porovnává s tuhostí připojovaného nosníku. Hranice pro kloubový $S_{j,P}$ a pro tuhý styčnick $S_{j,R}$ vymezují oblast polotuhých styčnicků, tato klasifikace se vztahuje pro referenční délku nosníku 2 m.



Obr. 42: Diagram tuhosti v programu

Metodou konečných prvků s komponentami je stanovena tuhost styčnicku **121,2 kNm/rad**.

6 Klasifikace styčnicku

Styčnick můžeme podle normy (EN 1993-1-8, 2005) klasifikovat podle tuhosti a podle únosnosti. Norma popisuje klasifikaci styčnicku na nosníku připojeného na obou koncích, tedy na nosníku prostě uloženém na dvojici sloupů nebo vetknutém. Přesto, že experiment byl prováděn na vykonzolovaném nosníku, budou získané výsledky aplikovány na rámovou konstrukci podobně jako na obr. 1.

Klasifikace podle tuhosti je v každém případě závislá na vlastnostech připojovaných prvků. Přípoj i s velmi vysokou počáteční rotační tuhostí nemusí být klasifikován jako tuhý. Pro kloubový styčnick platí vztah (3) z kapitoly 2.5.1.

Dosazení materiálových a průřezových charakteristik a rozpětí 3 m vodorovného nosníku do pravé strany nerovnice:

$$0,5 \frac{EI_b}{L_{b1}} = 0,5 \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 117,57 \cdot 10^{-8}}{3} = 41,2 \text{ kNm/rad} \quad (19)$$

$$\underline{105,1 \text{ kNm/rad} > 41,2 \text{ kNm/rad}}$$

Z porovnání tuhosti styčnicku získané při experimentu a limitní hodnoty pro kloubový styčnick vyplývá, že styčnick v rámové konstrukci s vodorovným nosníkem o délce 3 m je klasifikován jako polotuhý.

V případě, že délka vodorovného nosníku bude pouze 1 m, ohybová tuhost nosníku díky kratšímu rozponu výrazně vzroste. Tuhost styčnicku je potom v porovnání s tuhostí nosníku menší. Norma přípoj klasifikuje jako kloubový.

$$0,5 \frac{EI_b}{L_{b1}} = 0,5 \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 117,57 \cdot 10^{-8}}{1} = 123,4 \text{ kNm/rad} \quad (20)$$

$$\underline{105,1 \text{ kNm/rad} < 123,4 \text{ kNm/rad}}$$

Limitní hodnota délky nosníku pro klasifikaci polotuhého a kloubového přípoje je 1,17 m. Graf na obr. 42 s referenční délkou 2 m tuto klasifikaci potvrzuje. Přípoj v žádném případě nebude klasifikován jako tuhý.

Klasifikace podle únosnosti spočívá podle kapitoly 2.5.2 v porovnání momentové únosnosti styčnicku a připojovaných prvků.

Pro zatřídění styčnicku podle únosnosti bude uvažován stejný rám jako v předchozím případě, ale bez ohledu na jeho rozpětí. Pro styčnick s plnou únosností

platí vztah, kdy $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ nebo $M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}$. Uvažovaný rám je z profilů třídy průřezu 3 a elastickým průřezovým modulem $W_{el,y} = 26,13 \text{ cm}^3$. Pro třídu průřezu 3 se bude porovnávat elastická únosnost profilu.

$$M_{c,el,Rd} = M_{b,el,Rd} = f_y \cdot W_{el,y} = 235 \cdot 26,13 = 6,14 \text{ kNm} \quad (21)$$

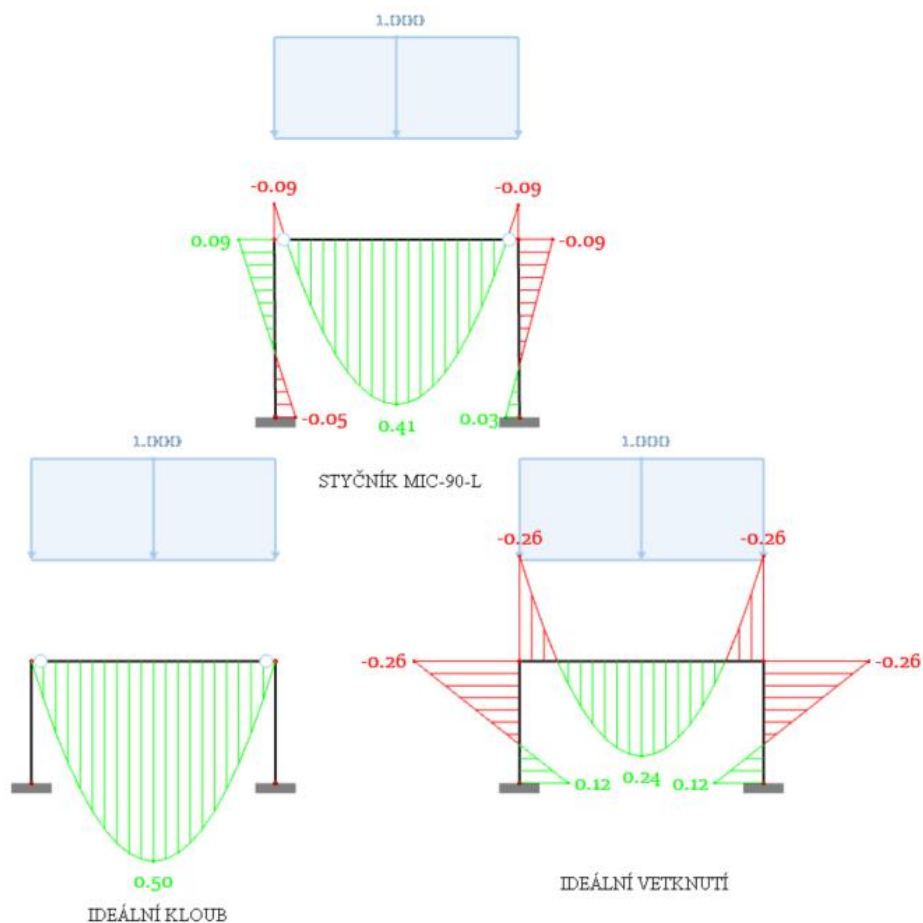
Podle výrobce je návrhová únosnost přípoje $M_{j,Rd} = 1,02 \text{ kNm}$. Z porovnání ohybových únosností profilu a přípoje ($6,14 \text{ kNm} > 1,02 \text{ kNm}$) je zřejmé, že styčnick je slabým místem konstrukce.

Styčnick je podle normy klasifikován jako kloubový z hlediska únosnosti, když jeho momentová únosnost $M_{j,Rd}$ nepřekračuje 0,25 násobek návrhového momentu přípoje s plnou únosností. Kloubový styčnick je tedy ten, jehož únosnost je menší, než $1,54 \text{ kNm}$ ($0,25 \cdot 6,14 \text{ kNm}$). Krajním případem přípoje s plnou únosností by byl styčnick, jehož momentová únosnost by byla stejná jako připojovaného profilu, tedy $6,14 \text{ kNm}$.

Z hlediska únosnosti je přípoj MIC-90-L klasifikován jako kloubový.

7 Analýza konstrukce s využitím rotační tuhosti

Výrobce dovoluje použití přípoje na vykonzolování nosníku a zároveň pro oboustranné upevnění vodorovného nosníku. Na obr. 43 je znázorněna rámová konstrukce po zavedení hodnoty počáteční ohybové tuhosti do globálního výpočetního modelu. Dojde k přerozdělení vnitřních sil, a to především ohybového momentu. Na obrázku jsou zobrazeny průběhy ohybových momentů ideálního kloubu a vetknutí obdobně jako na obr. 1. Hodnoty jsou shrnuty v tabulce 1. Z porovnání ideálních styčniců a zkoumaného styčnicu vyplývá, že svou ohybovou tuhostí je přípoj blíže kloubovému připojení.



Obr. 43: Porovnání ohybového momentu s ideálními přípoji a zkoumaným přípojem MIC-90-L

Schéma vykreslení vnitřních sil je platné pouze pro takové případy, kdy natočení ve styčnicích vodorovného nosníku a sloupek nepřesáhne hodnotu, která odpovídá $2/3 M_{j,Rd}$. Do této hodnoty bude podle normy (EN 1993-1-8, 2005) platit získaná počáteční rotační tuhost styčnicu. Při překročení této hodnoty by tuhost styčnicu odpovídala $S_{j,ini}/\eta$.

Tab. 1: Výsledky globální analýzy rámové konstrukce

| | moment v poli [kNm] | moment nad sloupkem [kNm] | průhyb uprostřed nosníku [mm] |
|-------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Ideální kloub | 0,50 | 0,00 | 1,0 |
| Zkoumaný styčnick | 0,41 | -0,09 | 0,8 |
| Vetknutí | 0,24 | -0,26 | 0,4 |

Výrazný vliv tuhosti styčnicku je vidět především na průhybu uprostřed nosníku

8 Závěr

Počáteční rotační tuhosti styčnicku jsou shrnuty v tabulce 2. Nejmenší tuhost byla stanovena experimentálně. Při zatěžování se deformovaly i další konstrukční prvky. Přestože byla konstrukce navržena tak, aby se přednostně deformoval styčnick, není tuhost ostatních částí konstrukce zanedbatelná. Vyšší tuhosti pro metodu komponent a metodu konečných prvků s komponentami lze vysvětlit uvažováním čelní desky jako plechu obdélníkového průřezu. Skutečná čelní deska je oslabena perforací. Lze předpokládat, že i další části styčnicku, jako profil sloupku a šrouby ve smyku, se deformují. Při uvážení přesnosti modelů se výsledky předpovědi dobře blíží k tuhosti získané experimentem.

Tab. 2: Počáteční rotační tuhosti styčnicku

| Řešení | $S_{j,ini}$, kNm/rad | Přesnost |
|---------------------------------------|-----------------------|----------|
| Metoda komponent | 127,1 | 1,21 |
| Metoda konečných prvků s komponentami | 121,2 | 1,15 |
| Experiment | 105,1 | 1,00 |

Tuhost zkoumaného styčnicku prokazatelně ovlivňuje statické chování konstrukce.

Použitá literatura

- Bajer, M., 2005. *Analýza polotuhých styčnicků v ocelových konstrukčních soustavách*, Brno, VUTIUM.
- EN 1993-1-1, 2006. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI, Praha.
- EN 1993-1-8, 2005. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-8: Navrhování styčnicků*, ČNI, Praha.
- Hilti ČR, s.r.o., 2016. *Montážní systémy pro instalace 2016/2017*, [Online].
- Hilti Saudi Arabia, 2018. *Heavy Duty Supports*, www.hilti.sa [Online].
- IDEAStatiCa, 2017. *Návrh ocelových styčnicků a přípojů*, Brno: IDEAStatiCa.
- IDEAStatiCa, 2017. *Theoretical Background*, Brno: IDEAStatiCa.
- Šabatka, L. a kol., 2017. *Vliv ohybové tuhosti styčnicku na návrh prvku ocelové konstrukce*, www.konstrukce.cz, [Online].
- Wald, F., 2003. *Odpovědi na otázky k navrhování styčnicků ocelových konstrukcí podle evropských norem*. Praha, Vydavatelství ČVUT v Praze. ISBN 80-01-02753-8
- Wald, F. & Sokol, Z., 1999. *Navrhování styčnicků*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-02073-8