

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Konstrukce a dopravní stavby

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lankové zábradlí pro železniční mosty

Cable railing for railway bridges

Vyhotovil: Bc. Radek Sklenář

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček Ph.D.

Květen 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Sklenář

Jméno: Radek

Osobní číslo: 395955

Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Lankové zábradlí pro železniční mosty

Název diplomové práce anglicky: Cable railing for railway bridges

Pokyny pro vypracování:

Návrh lankového zábradlí pro železniční mosty (křídla, přesypané objekty), návrh experimentu, spolupráce na provedení zkoušek a měření, vyhodnocení měření a numerická a parametrická analýza zábradlí pro stanovení dimenzí pro různé varianty prostorového uspořádání a přehledná tabulizace.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-2, ČSN EN 1993-2

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 21.3.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.3.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

20. květen 2018

.....  
Radek Sklenář

## Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce. Nejvíce ovšem děkuji své rodině za neuvěřitelně neutuchající podporu během celého mého studia.

**OBSAH**

<b>1. ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Obecně</b>	<b>2</b>
2.1.1. Účel experimentu	2
2.1.2. Popis zvoleného řešení	2
<b>2.2. Návrh zkušební sestavy</b>	<b>3</b>
2.2.1. Návrh pojezdového roštu	5
2.2.2. Návrh pojezdového vozíku	6
2.2.3. Popis figuríny	9
<b>2.3. Schéma a seznam měřených míst</b>	<b>11</b>
<b>2.4. Měřicí řetězec</b>	<b>11</b>
2.4.1. Specifikace měřicí linky	11
2.4.2. Měření tahové síly – siloměrem	12
2.4.3. Měření napětí – tenzometry	12
2.4.4. Měření vodorovných posunů	13
<b>2.5. Přehled zatěžovacích stavů</b>	<b>14</b>
<b>2.6. Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek zábradlí</b>	<b>16</b>
2.6.1. Charakteristiky zábradlí	16
2.6.2. Vyhodnocení zatěžovacích stavů	17
2.6.2.1. ZS1_11_fig_1,5m	17
2.6.2.2. ZS2_11_fig_2,0m	21
2.6.2.3. ZS3_11_1osoba_sezeni	26
2.6.2.4. ZS4_11_3osoba_sezeni	29
2.6.2.5. ZS5_11_1osoba_tlaceni	33
2.6.2.6. ZS6_11_3osoba_tlaceni	36
2.6.2.7. ZS7_11_1osoba_vandalizmus	40
2.6.2.8. ZS8_11_1osoba_vandalizmus_lomcovani	43
2.6.2.9. ZS9_11_1osoba_vandalizmus_mláceni	47
2.6.2.10. ZS10_11_pytel	50
2.6.2.11. ZS11_PM_pytel	53
2.6.2.12. ZS12_PM_1osoba_tlaceni	56
2.6.2.13. ZS13_PM_3osoba_tlaceni	60
2.6.2.14. ZS14_PM_fig_1,5m	63
2.6.2.15. ZS15_PM_fig_2m	66
2.6.2.16. ZS16_13_fig_1,5m	69
2.6.2.17. ZS17_13_fig_2m	73
2.6.2.18. ZS18_13_pytel	77
<b>2.7. Závěrečné shrnutí</b>	<b>80</b>

<b>3. TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>82</b>
<b>3.1. Výpočetní model</b>	<b>82</b>
3.1.1. Sloupky zábradlí	83
3.1.2. Ocelová lanka	86
3.1.3. Podpory a kotvení	88
3.1.4. Parametry výpočtu	89
3.1.5. Rozdíly výpočtového modelu s experimentem	90
<b>3.2. Zatížení</b>	<b>91</b>
3.2.1. Stálá zatížení – vlastní tíha $G_k$	91
3.2.2. Proměnná zatížení – $Q$	91
3.2.2.1. Zatížení dopravou $P_{j,k}$	91
3.2.2.2. Zatížení teplotou $T_k$	92
3.2.3. Mimořádná zatížení – $A$	93
3.2.3.1. Zatížení od pádu osob $A_d$	93
3.2.4. Dílčí součinitele zatížení	95
3.2.5. Součinitele kombinace $\Psi_i$	95
<b>3.3. Posouzení na mezní stav únosnosti ULS</b>	<b>95</b>
3.3.1. Návrhové kombinace zatížení	95
3.3.2. Posudek – ULS	96
<b>3.4. Výsledky a jejich vyhodnocení</b>	<b>96</b>
3.4.1. Délka zábradlí – 4 m	97
3.4.2. Délka zábradlí – 6 m	100
3.4.3. Délka zábradlí – 8 m	104
3.4.4. Délka zábradlí – 10 m	107
3.4.5. Sestavy zábradlí	110
3.4.6. Návrh kotvení lanka	113
3.4.7. Shrnutí a alternativní návrh	114
<b>4. ZÁVĚR</b>	<b>117</b>

**ANOTACE**

Předmětem diplomové práce je ocelové lankové zábradlí pro železniční mosty. Práce se věnuje přípravě, popisu a provedení experimentu, který zjišťuje schopnost jeho zadržení. Data z experimentu jsou zde analyzována, popsána, vyhodnocena a je podle nich stanoveno charakteristické zatížení zábradlí. V druhé části jsou představeny výpočetní modely pro různé varianty prostorového uspořádání, zatížené zjištěným zatížením z experimentu. Modely jsou využity k tvorbě přehledných tabulek dimenzí zábradelních prvků, tj. sloupků a lanek.

**ANNOTATION**

The subject of this diploma thesis is steel cable railing for railway bridges. The thesis pays attention to the preparation, description and execution of the experiment, which determines the ability of its retention. The experimental data are analyzed, described, evaluated and used to determine the characteristic load of the railing. The second part presents computational models for different spatial layout variants, loaded by the newly established load. The models are used to create overview tables for the dimensions of the railing elements, i.e. columns and cables.

**KLÍČOVÁ SLOVA**

ocelové, lankové, zábradlí, železniční, most, experiment, výpočetní, model

**KEYWORDS**

steel, cable, railing, railway, bridge, experiment, computational, model

## 1. Úvod

Zadáním diplomové práce je experiment, který zjišťuje schopnost zadržení ocelového lankového dopravně bezpečnostního mostního zábradlí. Toto zábradlí svojí subtilní konstrukcí nemůže být použito jako primární zadržný systém na mostních objektech, který slouží k zadržení dopravních prostředků. Práce se zabývá tím druhem zábradlí, které plní spíše sekundární funkci zadržení. Má za úkol zadržet osobu padající ze železničních mostních náspů do míst, kde může dojít ke zranění nebo smrti člověka a musí být schopno ustát účinky i dalších možných typů namáhání.

Umístění tohoto typu zábradlí je ve většině případů na římsách přesypaných mostních objektů, po stranách únikových schodišť nebo na horních plochách mostních křídel. V ojedinělých případech může být použito jako primární zadržný systém na horních okrajích opěrných zdí, na menších, méně zatížených lávkách pro pěší, nebo na obslužných servisních lávkách železničních mostů pod úrovní mostovky.

Po provedení experimentu následuje část s modely zábradlí, které vedou k vytvoření přehledných tabulek dimenzí prvků zábradlí podle jeho délky. Tyto tabulky mohou být použity projektanty pro návrh lankového zábradlí na skutečných mostech.



Obr. 1 Zábradlí na přesypaném mostě na D1



## 2. Experimentální část

### 2.1. Obecně

#### 2.1.1. Účel experimentu

Důvodem konání experimentu je absence potřebných vzorů a podkladů pro projektanty mostních, či jiných stavebních objektů. Ačkoliv takovéto podklady existují pro zábradelní systémy s již zmíněnou primární funkcí zadržení (svodidla, zábradelní svodidla, zábradlí se svislou či vodorovnou výplní) viz [1], neexistují pro lanková zábradlí. Současně též nejsou známy hodnoty zatížení, které by byly možné aplikovat na systém lankových zábradlí pro zajištění bezpečnosti osob. Dále není zcela jasné, zda tenká lanka jsou schopna osobu při pádu zachytit a nezpůsobí například její přepadnutí při nárazu. Vysvětlení těchto nejasností je hlavním cílem experimentu.

Dalším výstupem experimentu bude shrnutí, obsahující extrémní hodnoty naměřených napětí, ohybových momentů a působících sil vzniklých v zábradlí při různých zatěžovacích stavech.



Obr. 2 Zábradlí na křídle mostu na D1

#### 2.1.2. Popis zvoleného řešení

Aby zábradlí plnilo svojí funkci, musí být mimo jiné schopno zadržet člověka padajícího ze svahu o sklonu nejvíce používaném na dnešních železničních tratích. Dále musí být schopno vydržet účinky od jiného typu zatížení, např. od sezení, tlačení či vandalizmu. Experiment měl za úkol tyto zatěžovací stavy v měřítku 1:1 napodobit.

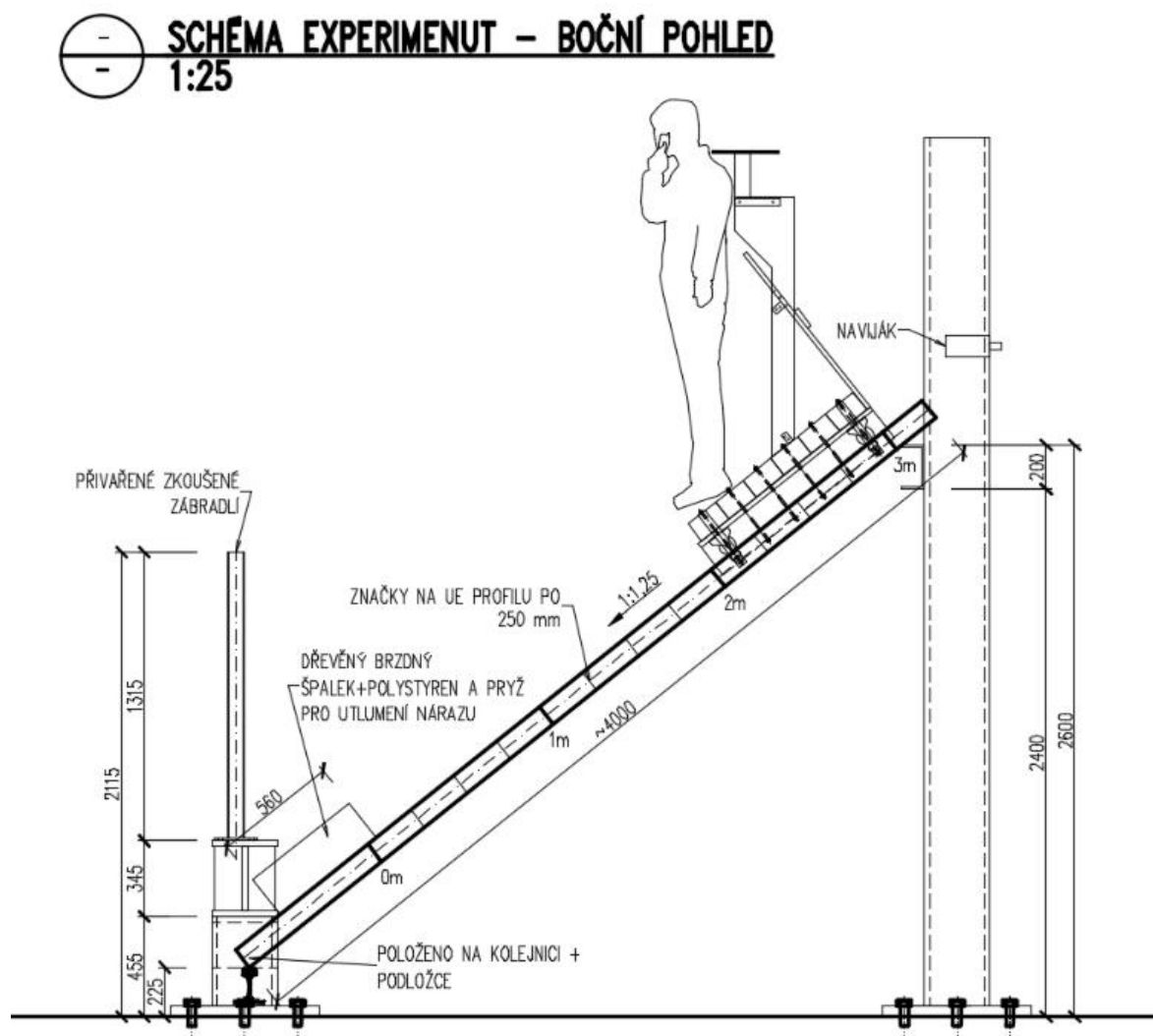
Nejproblémovější bylo napodobení pádu. Zvoleným řešením se stala simulace pomocí zkušební sestavy, sestávající z pojezdového roštu a vozíku s figurínou. Po roštu jezdil vozík, na

kterém byla figurína přichycena, přičemž pod roštem se umístil zkušební přípravek. Rozjetý vozík se před zábradlím vynuceně zastavil, figurína setrvačností vyletěla dopředu a dopadla na zábradlí.

Pomocí měřicí sestavy se měřily hodnoty sil v horním lanku, hodnoty napětí v patách sloupků a hodnoty vodorovných posunů sloupků v úrovni horního lanka u všech zvolených zatěžovacích stavů.

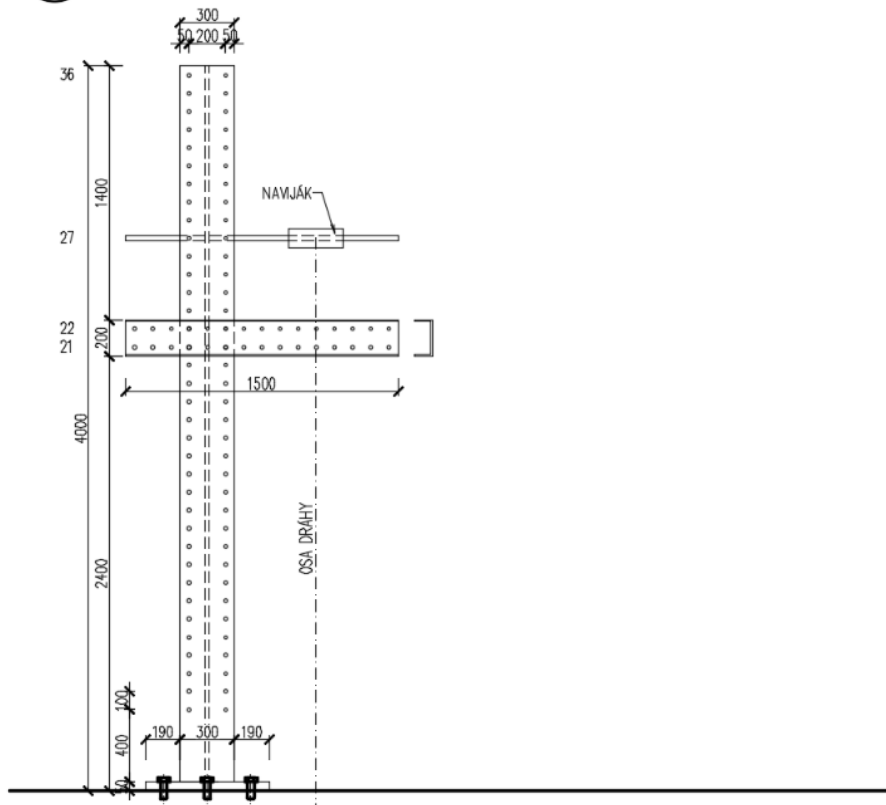
## 2.2. Návrh zkušební sestavy

Zkušební sestava měla podobu nakloněného ocelového roštu, po jehož dvou hlavních nosnících jezdil dřevěný vozík, viz následující obrázky. Jízda probíhala po gumových pojezdových kolečkách. Vozík měl na sobě připevněný opěrný rám pro fixaci figuríny. Zapříčinění setrvačnosti po zabrzdění vylétla figurína z rámu do připraveného zábradlí. Místem experimentu se stala ocelářská hala na půdě kampusu Stavební fakulty ČVUT, kde bylo možno využít volného prostoru pro experiment a zvedacího jeřábu pro manipulaci.



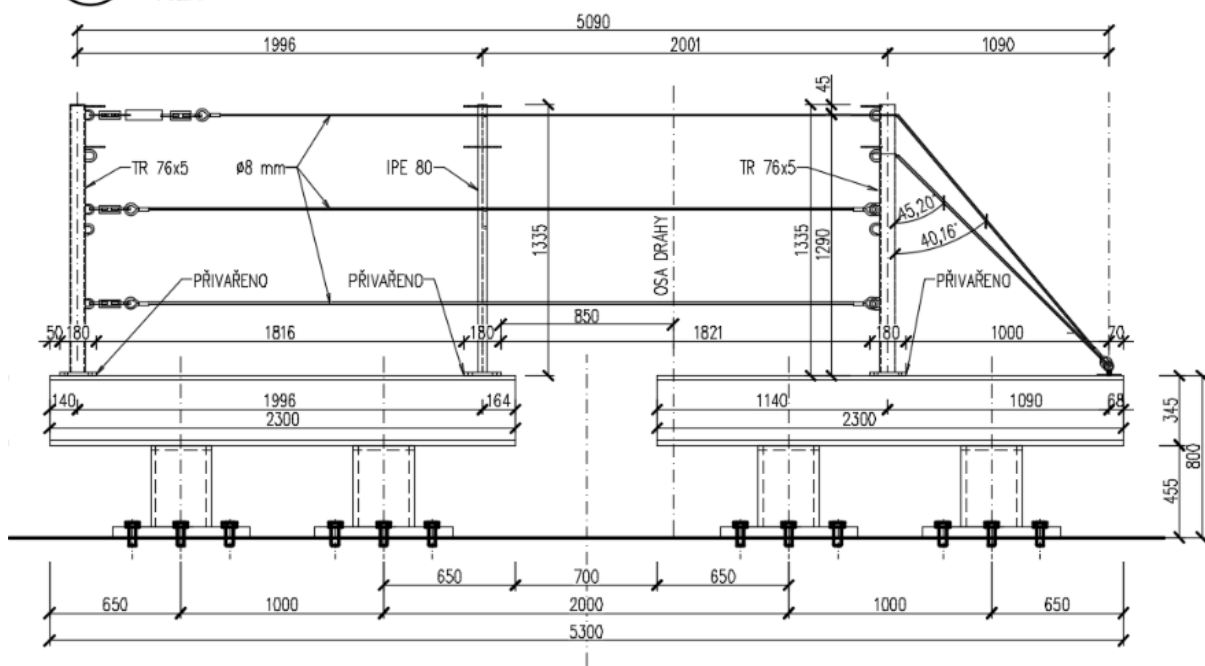
Obr. 3 Schéma experimentu – boční pohled

— **SCHÉMA EXPERIMENTU – PŘEDNÍ POHLED NA OPĚRNÝ SLOUP**  
 — 1:25



Obr. 4 Schéma experimentu – přední pohled

— **SCHÉMA EXPERIMENTU – PŘEDNÍ POHLED NA ZÁBRADLÍ**  
 — 1:25



Obr. 5 Schéma experimentu - zábradlí

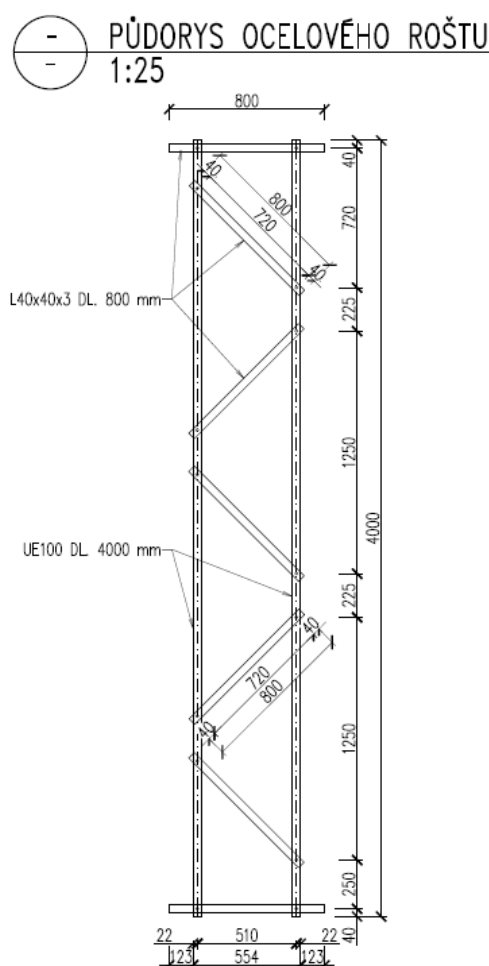
### 2.2.1. Návrh pojezdového roštu

Podle existujících svahů na mostech bylo zvoleno, že pojezdový rošt bude proveden ve sklonu cca od **1:1,25** do **1:2,5** a bude dostatečně dlouhý, tj. cca **3-5 m**, aby měl vozík s figurínou čas vyvinout potřebnou rychlost sjezdu. Výsledný sklon byl proveden **1:1,25**, což odpovídá běžným strmějším železničním násypům. Pro výpočet rychlosti byl zohledněn zákon zachování energie s uvažováním třecí síly:

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgfl \cos \alpha = mgpl, \text{ kde}$$

$v$  je rychlost pohybu,  $p$  sklon dráhy,  $l$  délka dráhy a  $f$  součinitel smykového tření.

Rošt byl sestaven ze dvou ocelových profilů **UE 100**, dlouhých **4,0 m** a ze sedmi kratších profilů typu **L 40x40x3**, délky **0,8m**. UE profily plnili funkci hlavních pojezdových nosníků, zatímco L profily funkci ztužení. Jejich spojení bylo vyřešeno pomocí kombinace šroub plus podložka plus matka. Půdorysná geometrie roštu je zobrazena na Obr. 6.



Obr. 6 Půdorys ocelového pojezdového roštu



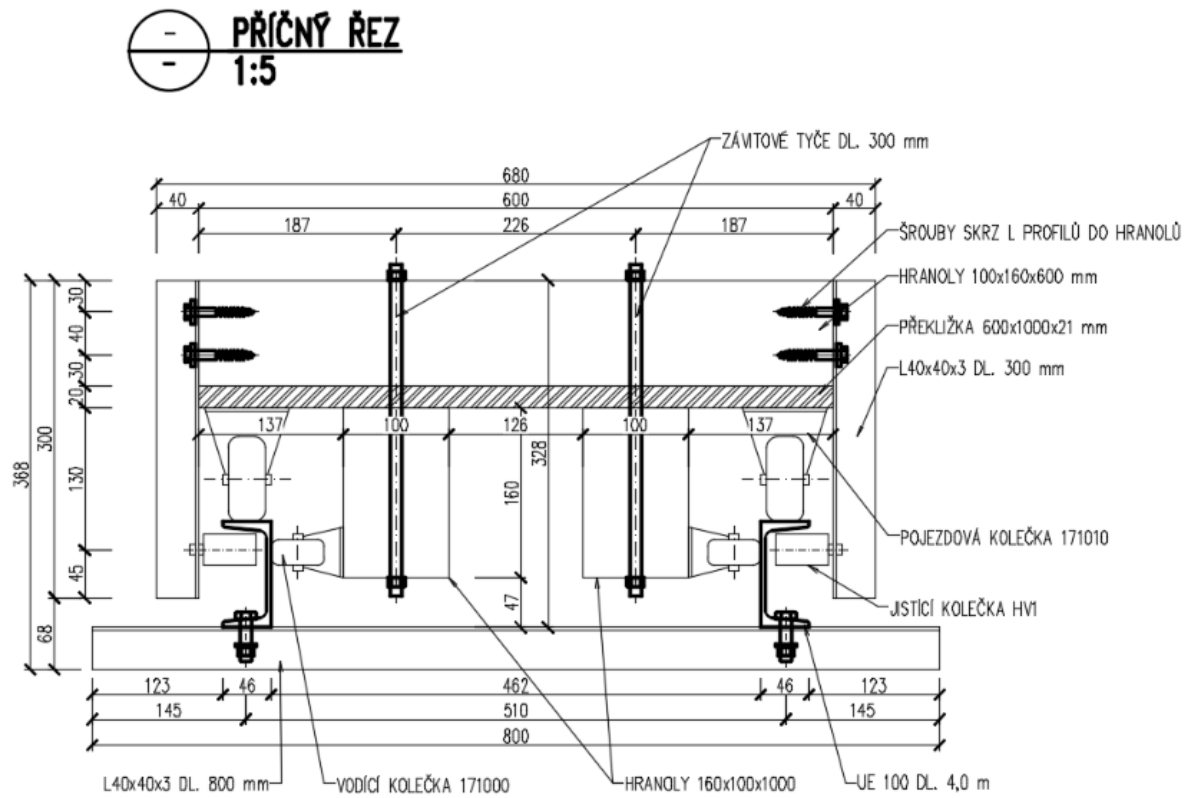
Obr. 7 Fotka ocelového pojezdového roštu a opěrného sloupu

Profily byly zakoupeny ve společnosti KONDOR s.r.o., která se zabývá prodejem hutních materiálů a prostředky pro spoje ve velkoobchodě Feron, a.s. Rošt byl smontován na místě pozdějšího průběhu experimentu; na fakultě školy.

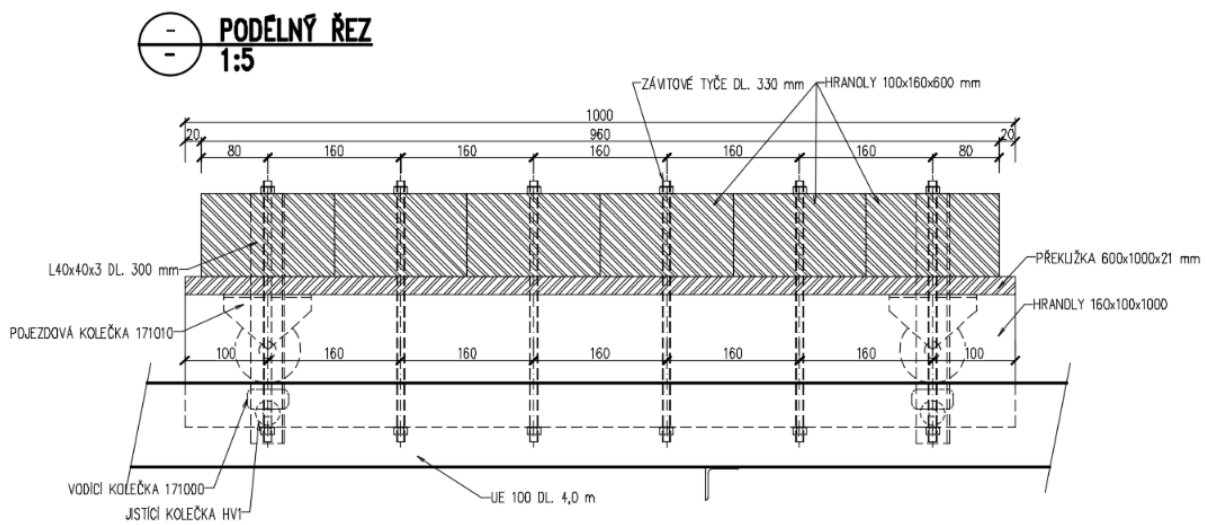
### 2.2.2. Návrh pojezdového vozíku

Pojízdový vozík byla ručně sestavená konstrukce z dřevěných hranolů **100/100mm** a z dřevěné překližky o tloušťce **21 mm**. Smrkové dřevo zajistilo požadovanou hmotnost a tuhost. Spojení bylo provedeno pomocí hřebíky a závitovými tyčemi M6.

Plynulý pohyb vozíku po ocelovém roštu umožňovala gumová kolečka trojího typu. Pojezdová kolečka seděla na UE profilech. Vodící kolečka fixovala příčný pohyb při jízdě a jistící kolečka znemožňovala výpadek vozíku z roštu. Celková délka vozíku byla **1,0 m**. Připojení koleček bylo řešeno pomocí vrutů do dřeva a kombinací šroub – podložka – matka do oceli.



Obr. 8 Pojezdový vozík – příčný řez

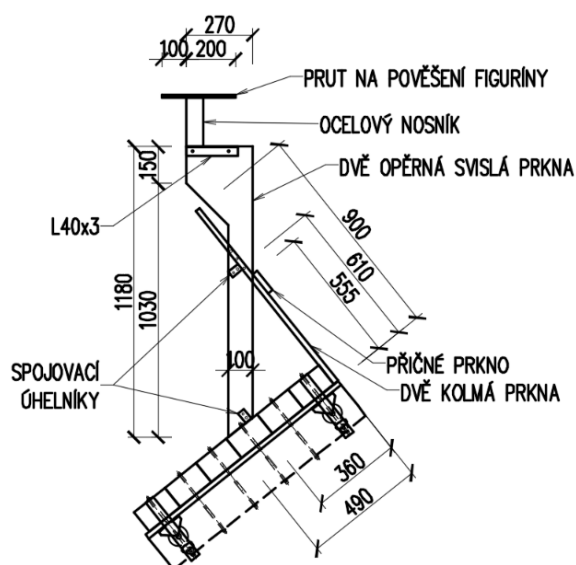


Obr. 9 Pojezdový vozík – podélný řez



Obr. 10 Fotka dokončeného vozíku

Pro upevnění figuríny k vozíku sloužil podpůrný rám. Byl sestaven z dřevěné překližky, z ocelových L profilů a nosníku, ze spojovacích úhelníků a prutu na zavěšení figuríny. Figurína visela na prutu prostrčeném skrz ocelové oko zezadu na jejím krku.



Obr. 11 Opěrný rám pro figurínu



Obr. 12 Fotka pojezdového vozíku s opěrným rámem na jízdní dráze

Pro výrobu vozíku byly dřevěné prvky zakoupeny ve společnosti Dřevobis, s.r.o., která nabízí deskový materiál na dřevěné bázi. Kolečka byla pořízena ve firmě ADOBY, s.r.o., velkoobchodě s tesařským kovááním a ostatní prvky, jako spojovací prostředky a závitové tyče, ve velkoobchodě Feron, a.s. Vozík byl smontován na místě pozdějšího průběhu experimentu, tedy na fakultě školy.

### 2.2.3. Popis figuríny

Pro potřeby nejpřesnější simulace pádu, bylo nutné sehnat nárazové těleso, které svojí velikostí, hmotností, ale i prostorovým uspořádáním odpovídá skutečnému tělu dospělého lidského jedince. Použita byla figurína Rescue Randy od společnosti ZAHAS, s.r.o., specializující se na záchranné a hasičské systémy. Figurína přesně kopíruje hmotnost a odolnost lidského těla. Je vyrobena z odolného vinylu, obsahující kabely potažené plastem. Obsahuje navíc vyztužení na hýždích pro zvýšení odolnosti figuríny, tudíž její konstrukce zaručuje dlouhodobou životnost. Má kloubní spoje umožňující snadné polohování. Je vysoká **185 cm** a váží **75 kg** a rozložení její zátěže je podle lidské váhové tabulky.





*Obr. 13 Fotka figuríny – příklad polohovatelnosti*



*Obr. 14 Figurína zavěšená na pojízdném vozíku*

## 2.3. Schéma a seznam měřených míst

Během experimentu byly snímači měřeny tyto veličiny:

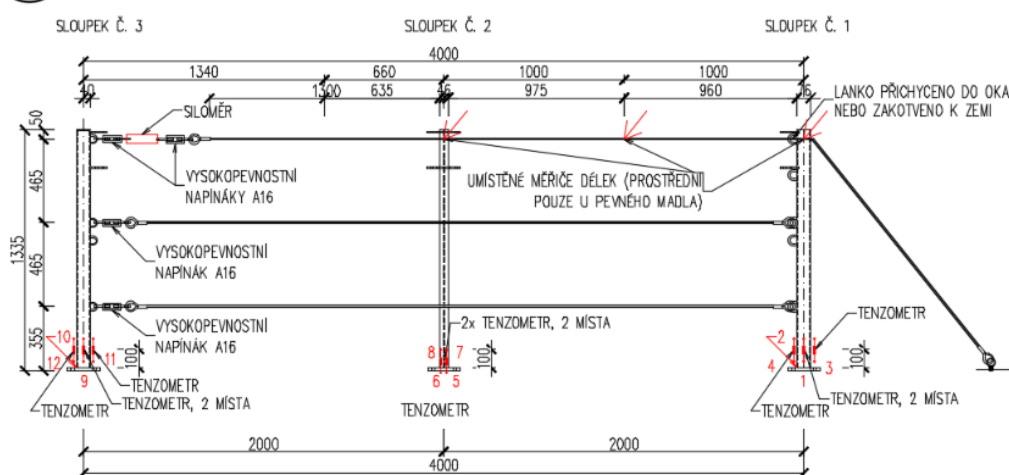
- Tahová síla v horním předepnutém ocelovém lanku
- Hodnoty deformací všech ocelových sloupků
- Vodorovný posun směrem kolmo na zábradlí v místech dle Obr. 15.

Hodnota předepnutí lanka byla **1 kN**. Vycházela z výpočtu prodloužení vlivem změny teploty:

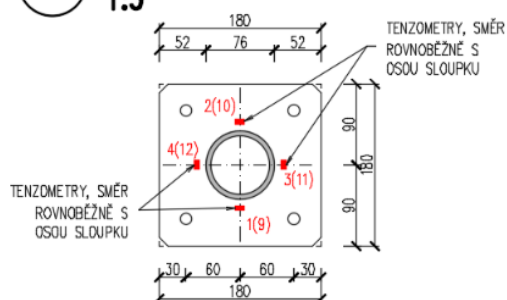
$$F = EA\alpha\Delta T, \text{ kde}$$

$EA$  je tuhost v tahu/tlaku,  $\alpha$  je koeficient délkové teplotní roztažnosti oceli,  $l$  je délka lanka a  $\Delta T$  je změna teploty.

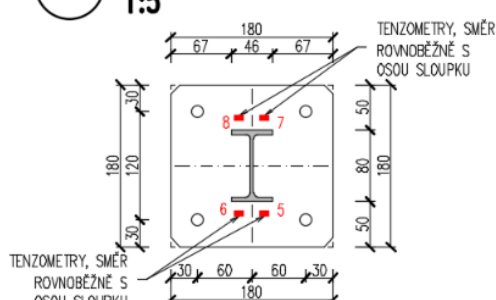
### UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ 1:25



### KRAJNÍ SLOUPEK – UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ 1:5



### VNITŘNÍ SLOUPEK – UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ 1:5

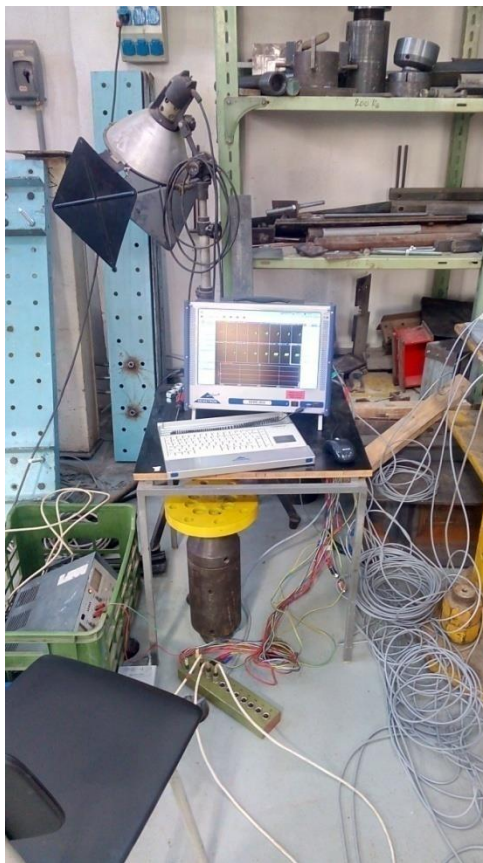


Obr. 15 Schéma snímačů

## 2.4. Měřicí řetězec

### 2.4.1. Specifikace měřicí linky

Pro měření byla použita měřicí ústředna DewetronDewe 5000 (evidenční číslo 9560), která byla při měření řízena počítačem, na kterém se ukládala změřená data. K ovládání ústředny byl použit program “Dewesoft”.



Obr. 16 Fotka měřicí linky

#### 2.4.2. Měření tahové síly – siloměrem

Pro měření síly byl použit snímač HBM typ U2B s rozsahem 0-10 kN.



Obr. 17 Fotka použitého siloměru

#### 2.4.3. Měření napětí – tenzometry

Na každém sloupku, **100 mm** nad patními deskami, byly nalepeny 4 tenzometry ve směru svislých os sloupků, které měřily deformace v obou vodorovných směrech. Byly použity tenzometry typu **HBM 10/120 LY11a** zapojeny do ústředny DewetronDewe 5000.



Obr. 18 Nalepené tenzometry na sloupku profilu TR 76x5



Obr. 19 Nalepené tenzometry na sloupku profilu IPE 80

#### 2.4.4. Měření vodorovných posunů

Potenciometrický snímač průhybu umožňuje měřit statické průhyby stavebních konstrukcí v rozsahu  $\pm 50$  mm, pokud je použita kladka snímače s menším poloměrem, nebo  $\pm 100$  mm, pokud je použita kladka s větším poloměrem.

Při popisované zkoušce tyto snímače byly použity k měření vodorovných průhybů lanka a byly využity kladky s menším poloměrem.



Obr. 20 Zapojené snímače dráhy

## 2.5. Přehled zatěžovacích stavů

Proběhlo celkem **18 zatěžovacích stavů**. Zahrnovaly simulace pádů do zábradlí z různých výšek, sezení na zábradlí, tlačení do zábradlí a vandalizmus.

Přehled zatěžovacích stavů:

- ZS1\_11\_fig\_1,5m
- ZS2\_11\_fig\_2m
- ZS3\_11\_1osoba\_sezeni
- ZS4\_11\_3osoba\_sezeni
- ZS5\_11\_1osoba\_tlaceni
- ZS6\_11\_3osoba\_tlaceni
- ZS7\_11\_1osoba\_vandalizmus
- ZS8\_11\_1osoba\_vandalizmus\_lomcovani
- ZS9\_11\_1osoba\_vandalizmus\_mlaceni
- ZS10\_11\_pytel
- ZS11\_PM\_pytel
- ZS12\_PM\_1osoba\_tlaceni

- ZS13\_PM\_3osoba\_tlaceni
- ZS14\_PM\_fig\_1,5m
- ZS15\_PM\_fig\_2m
- ZS16\_13\_fig\_1,5m
- ZS17\_13\_fig\_2m
- ZS18\_13\_pytel

Podrobněji ke každému **ZS** viz *Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek zábradlí.*



*Obr. 21 Pohled na zkušební sestavu*

## 2.6. Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek zábradlí

### 2.6.1. Charakteristiky zábradlí

Zábradlí je vyrobeno z oceli **S235JR**, která má hodnotu mezi kluzu  $f_y = 235 \text{ MPa}$  a mezi pevnosti  $f_u = 360 \text{ MPa}$ . Extrémní ohybové momenty v každém zatěžovacím stavu budou ve vyhodnocení porovnávány s momentovou únosností. Sloupky jsou z profilů **TR 76x5** a **IPE 80** a jejich momentová elastická a plastická únosnost je:

$$M_{Rd,el}^{TR} = W_{el} \times f_y = 4,37 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd,pl}^{TR} = W_{pl} \times f_y = 5,93 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd,el}^{IPE} = W_{el} \times f_y = 4,70 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd,pl}^{IPE} = W_{pl} \times f_y = 5,46 \text{ kNm}.$$

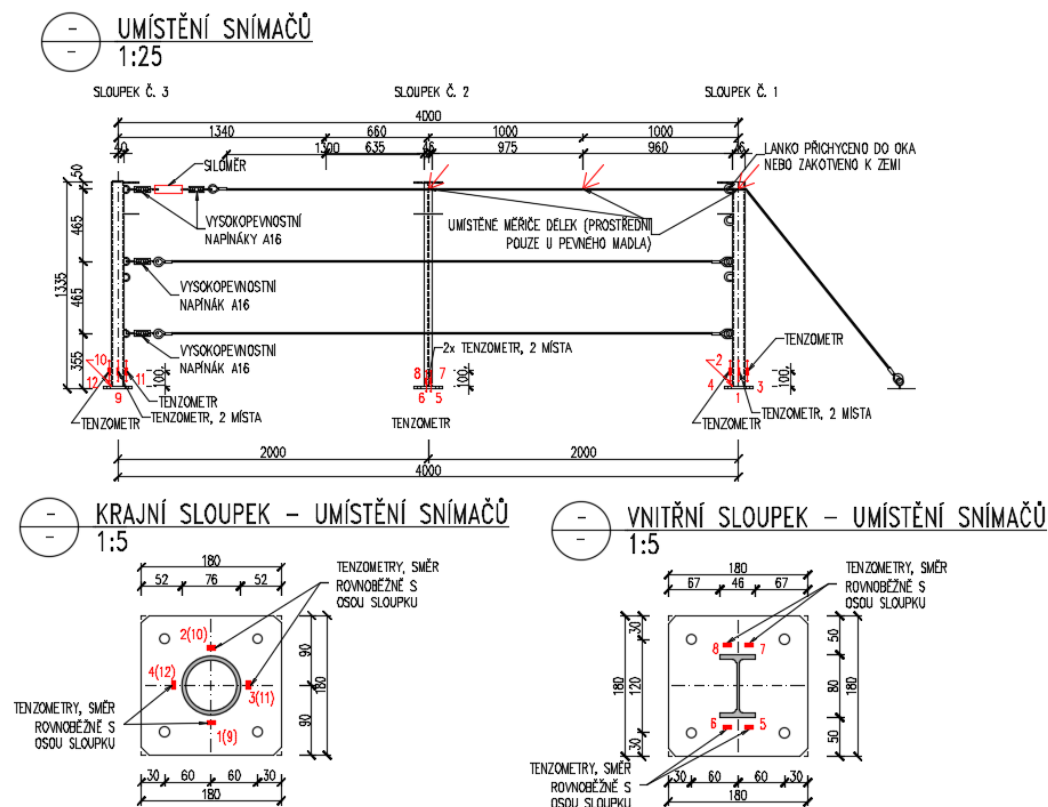
Hodnoty průřezových modulů v ohybu pro oba profily jsou:

$$W_{el}^{TR} = 18\,585 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl}^{TR} = 25\,247 \text{ mm}^3$$

$$W_{el}^{IPE} = 20\,000 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl}^{IPE} = 23\,220 \text{ mm}^3.$$



Obr. 22 Schéma umístění snímačů

## 2.6.2. Vyhodnocení zatěžovacích stavů

### 2.6.2.1. ZS1\_11\_fig\_1,5m

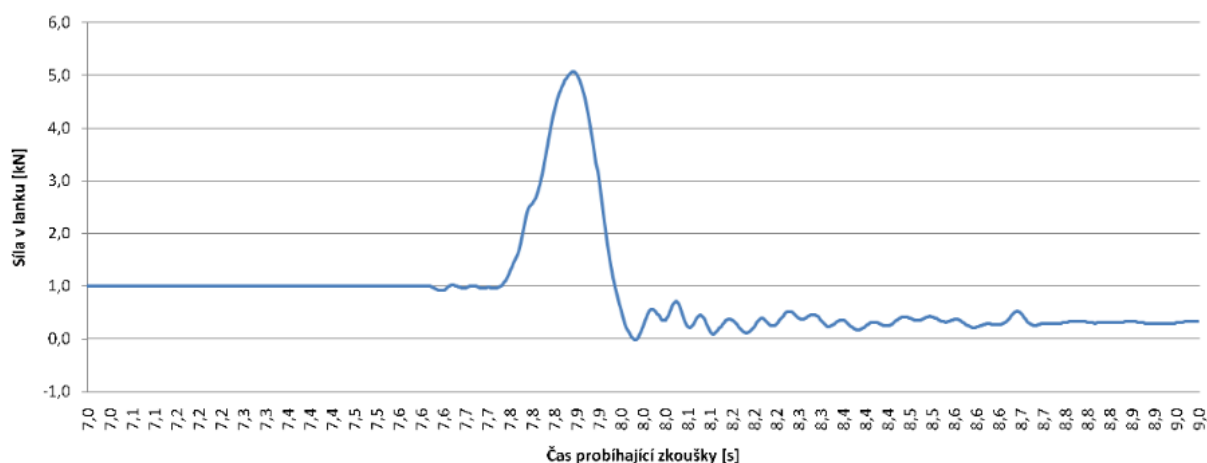
#### Popis zatěžovacího stavu

První zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **1,5 m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **23 km/h**, narazila figurína do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2.

*Poznámka:* rychlost nárazu byla volena tak, aby odpovídala rychlosti pádu osoby z násypu. Ta byla volena v rozmezí cca okolo 25 km/h, což odpovídá hodnotám naměřeným při sbíhání kopce na svahu obdobného sklonu.

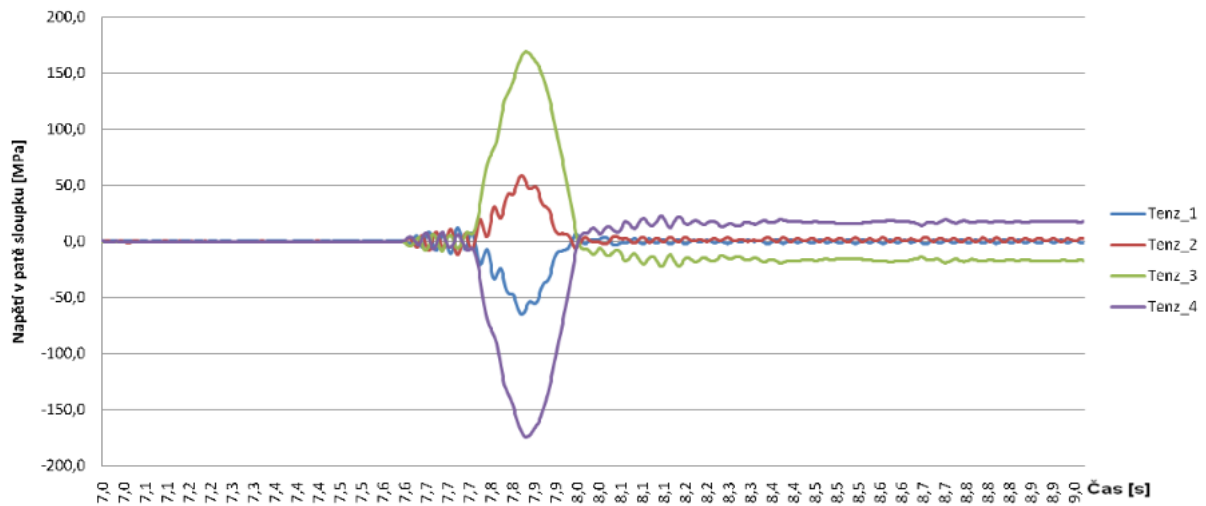
Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  **$h = 1100 \text{ mm}$**  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předepnuté na sílu  **$F_p = 1,0 \text{ kN}$** . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

#### Výsledky zatěžovacího stavu

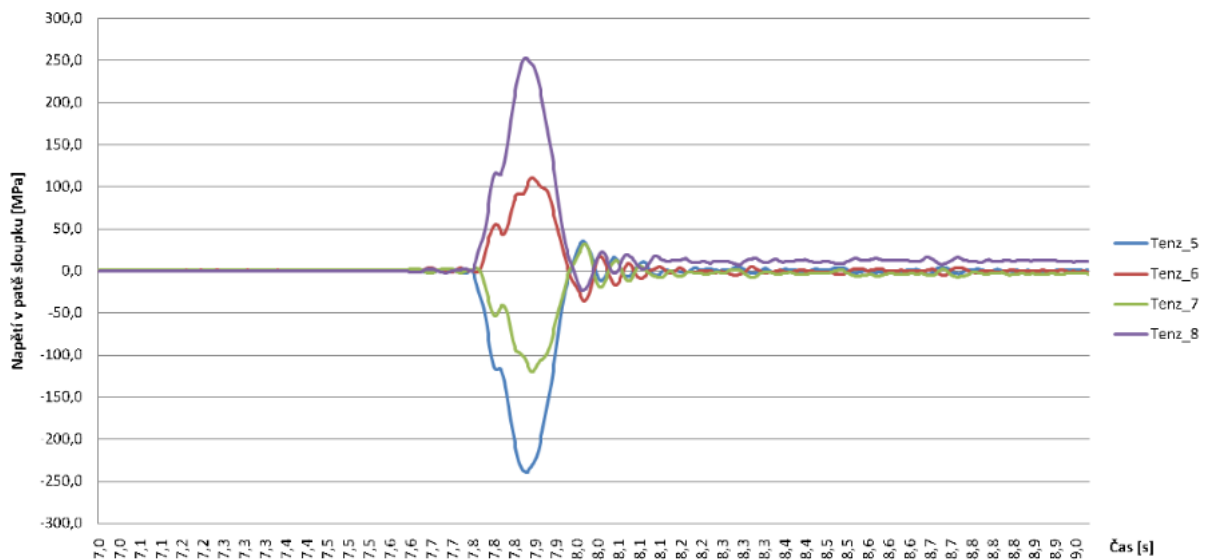


Obr. 23 Graf průběhu osově síly v lanku během 1. ZS

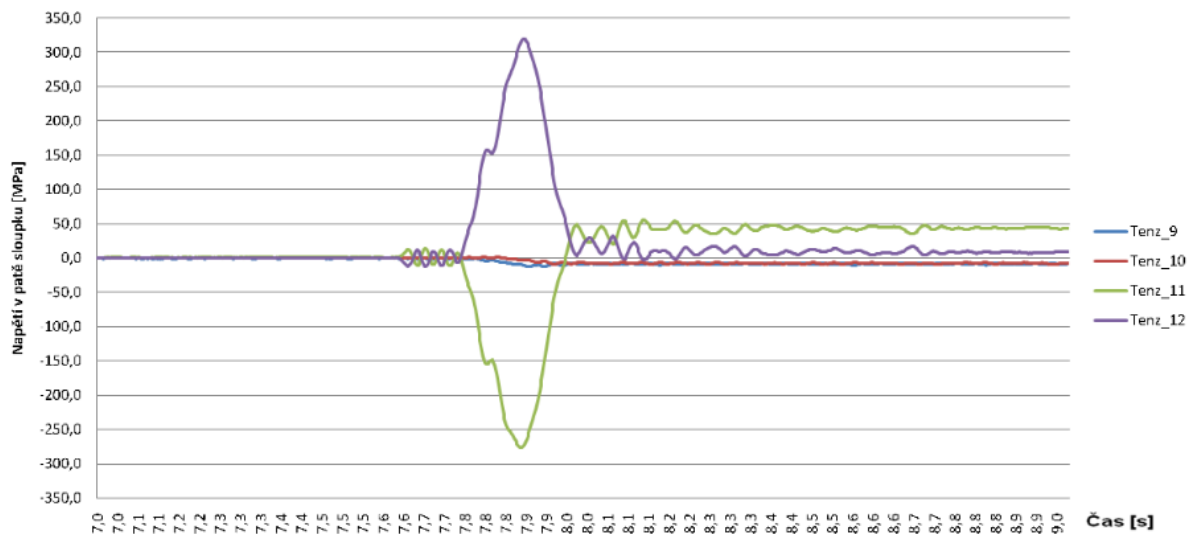




Obr. 24 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 1.ZS



Obr. 25 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 1.ZS



Obr. 26 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 1.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	11,653	-64,990
	Tenz_2	58,733	-11,639
	Tenz_3	<b>169,667</b>	-22,404
	Tenz_4	22,625	<b>-174,319</b>
2 IPE 80	Tenz_5	35,296	<b>-239,332</b>
	Tenz_6	110,753	-36,493
	Tenz_7	31,033	-120,300
	Tenz_8	<b>253,187</b>	-22,910
3 TR 76x5	Tenz_9	1,408	-12,055
	Tenz_10	1,059	-8,759
	Tenz_11	55,388	<b>-276,756</b>
	Tenz_12	<b>319,511</b>	-12,744

Obr. 27 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 1 ZS

Během nárazu bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{1ZS,max} = 5,07kN$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0kN$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{1ZS,fin} = 0,31kN$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{1ZS,max} = 319,51 MPa$  a  $\sigma_{1ZS,min} = -276,76 MPa$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předeprnutí a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 28 Průběh zkoušky 1.ZS



Obr. 29 Průběh zkoušky I.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že během nárazu se sloupek č. 1 choval čistě elasticky, zatímco u sloupků č. 2 a 3 byla na moment překročena hodnota meze kluzu. U sloupku č. 3 ve větší míře. Ocel krátce plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí, resp. zbytková deformace. Ovšem v rámci tohoto zatěžovacího stavu měly tyto veličiny malé hodnoty.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 64,99 = 1,30 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 174,32 = 3,49 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 142,11 = 2,64 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 12,06 = 0,28 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 319,51 = 7,42 \text{ kNm}$ .

Maximální hodnota napětí, která se může v této oceli objevit, je hodnota meze kluzu. Po jejím dosažení už reálné napětí neroste a deformace se zvyšuje nelineárně bez závislosti na napětí. Je nutné dodat, že hodnoty ohybových momentů napsané výše, kdy je mez kluzu překročena, nejsou skutečné hodnoty momentů, které se ve sloupcích vyskytují. Reálné hodnoty jsou tedy hodnoty plastických únosností sloupků, viz výše.

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu od nárazu zde překročila plastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se v tomto směru deformoval.

$$M_{Ed,z,3} = 7,42 \text{ kNm} > M_{Rd,pl}^{IPE} = W_{pl} \times f_y = 5,46 \text{ kNm}$$

Velikost nárazové síly od figuríny se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,1ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,30 + 2,64}{1,17} = 3,37 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,17 \text{ m}$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

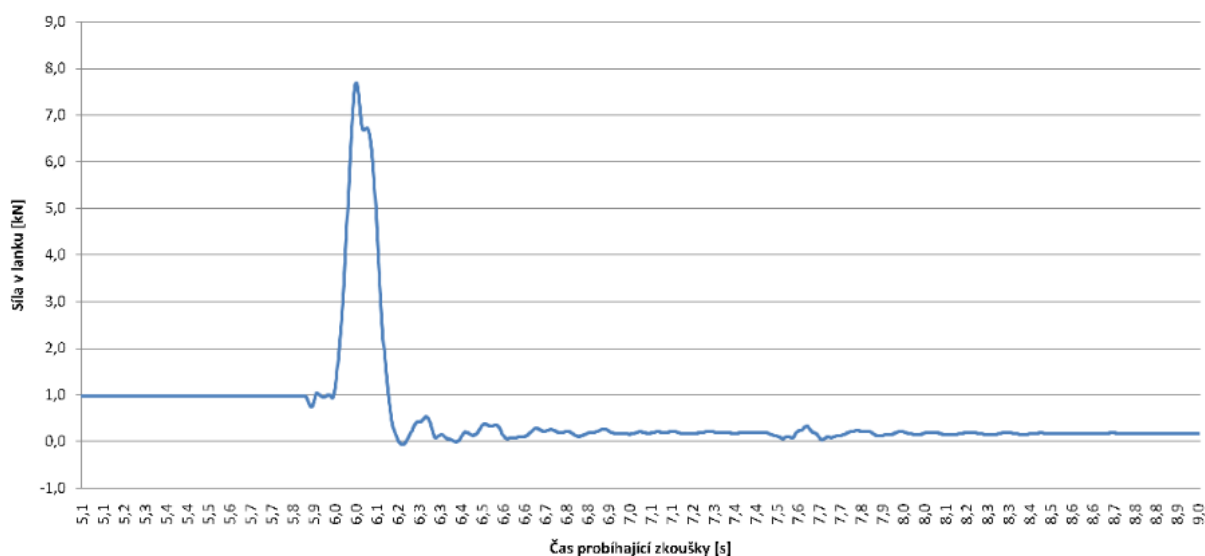
V tomto zatěžovacím stavu nevyhověl krajní sloupek č. 3, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.

#### 2.6.2.2. ZS2\_11\_fig\_2,0m

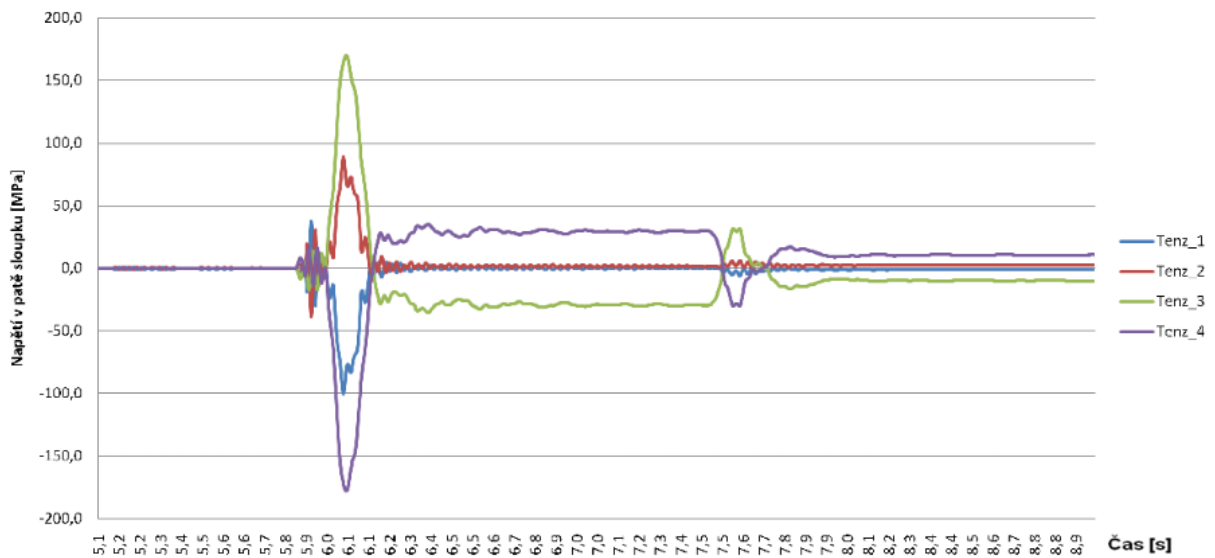
##### Popis zatěžovacího stavu

Druhý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **2,0m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **24 km/h**, narazila figurína do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

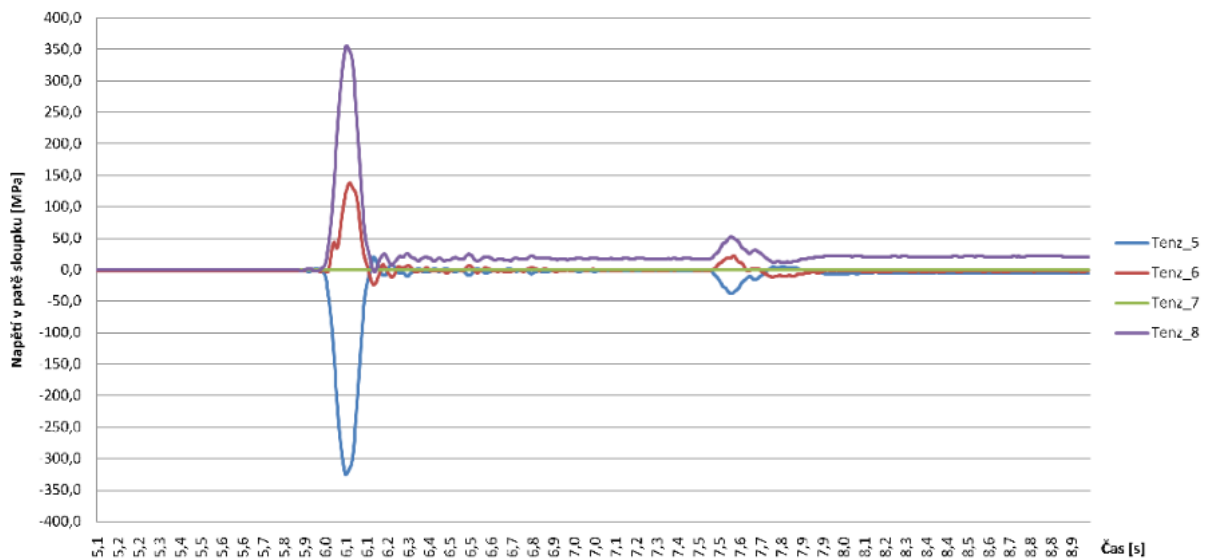
##### Výsledky zatěžovacího stavu



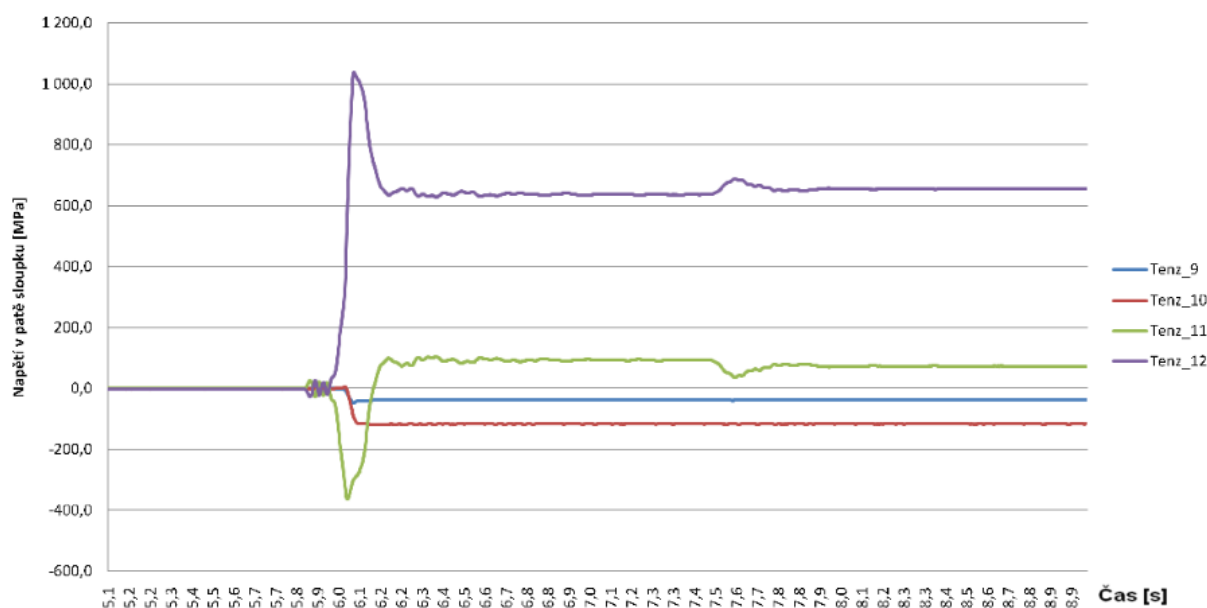
Obr. 30 Graf průběhu osově síly v lanku během 2.ZS



Obr. 31 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 2.ZS



Obr. 32 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 2.ZS



Obr. 33 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 2.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	37,912	-100,168
	Tenz_2	89,376	-38,835
	Tenz_3	<b>169,965</b>	-35,450
	Tenz_4	35,291	<b>-178,080</b>
2 IPE 80	Tenz_5	20,687	<b>-325,951</b>
	Tenz_6	137,851	-23,285
	Tenz_7	-0,880	-3,404
3 TR 76x5	Tenz_8	<b>356,168</b>	-12,126
	Tenz_9	11,168	-47,144
	Tenz_10	9,773	-119,746
	Tenz_11	103,840	<b>-361,440</b>
	Tenz_12	<b>1038,676</b>	-26,002

Obr. 34 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 2 ZS

Během nárazu bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{2ZS,max} = 7,68kN$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0kN$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{2ZS,fin} = 0,18kN$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{2ZS,max} = 1038,68 MPa$  a  $\sigma_{2ZS,min} = -361,44 MPa$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předepnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace**



*Obr. 35 Průběh zkoušky 2.ZS*



*Obr. 36 Průběh zkoušky 2.ZS*

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že během nárazu se sloupek č. 1 choval čistě elasticky. Naměřené napětí ve sloupcu č. 2 zhruba 1,5x překročilo mez kluzu, zatímco ve sloupcu č. 3 bylo přetvoření odpovídající mezi kluzu překročeno více než 4x. Ocel výrazně plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové „fiktivní“ napětí o hodnotě cca  $\sigma_{fin} = 600 \text{ MPa}$  a zbytková deformace o hodnotě cca:

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\sigma_{fin}}{E} = \frac{600}{210000} = 0,003 [-] = 3000 \mu\text{m/m}$$

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 100,17 = 1,86 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 178,08 = 3,31 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 25\,247 \times 178,08 = 4,50 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 119,75 = 2,78 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 1038,68 = 24,12 \text{ kNm}$

Maximální hodnota napětí, která se může v této oceli objevit, je hodnota meze kluzu. Po jejím dosažení už reálné napětí neroste a deformace se zvyšuje nelineárně bez závislosti na napětí. Je nutné dodat, že hodnoty ohybových momentů napsané výše, kdy je mez kluzu překročena, nejsou skutečné hodnoty momentů, které se ve sloupcích vyskytují. Reálné hodnoty jsou tedy hodnoty plastických únosností sloupců, viz výše.

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu od nárazu zde mnohonásobně překročila plastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se v tomto směru deformoval.

$$M_{Ed,z,3} = 26,02 \text{ kNm} \gg M_{Rd,pl}^{IPE} = 5,46 \text{ kNm}$$

Figurína vyvodila svým nárazem do zábradlí silu:

$$F_{Ed,2ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,86 + 4,50}{1,17} = 5,44 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,17 \text{ m}$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

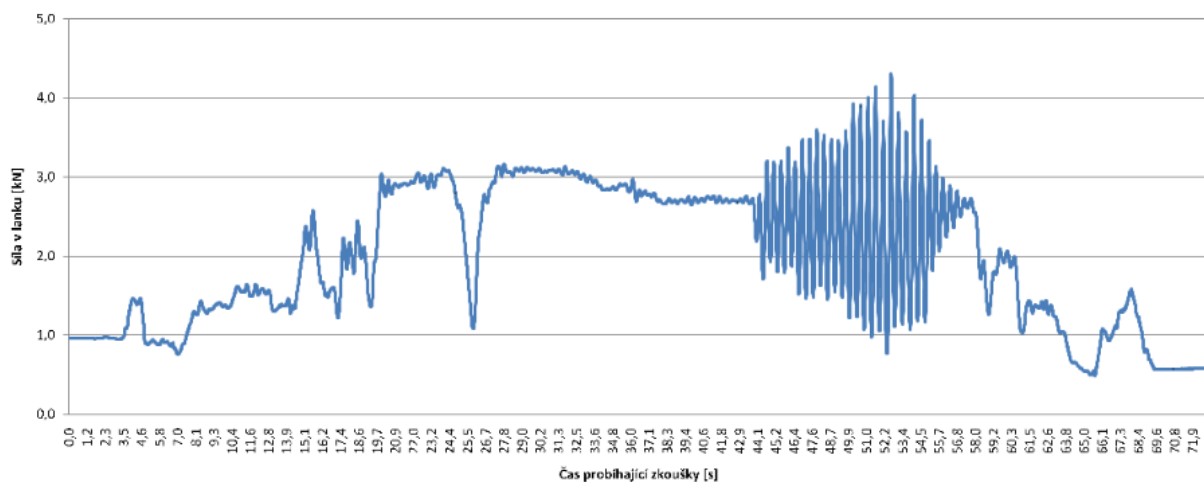
V tomto zatěžovacím stavu nevyhověl krajní sloupek č. 3, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.



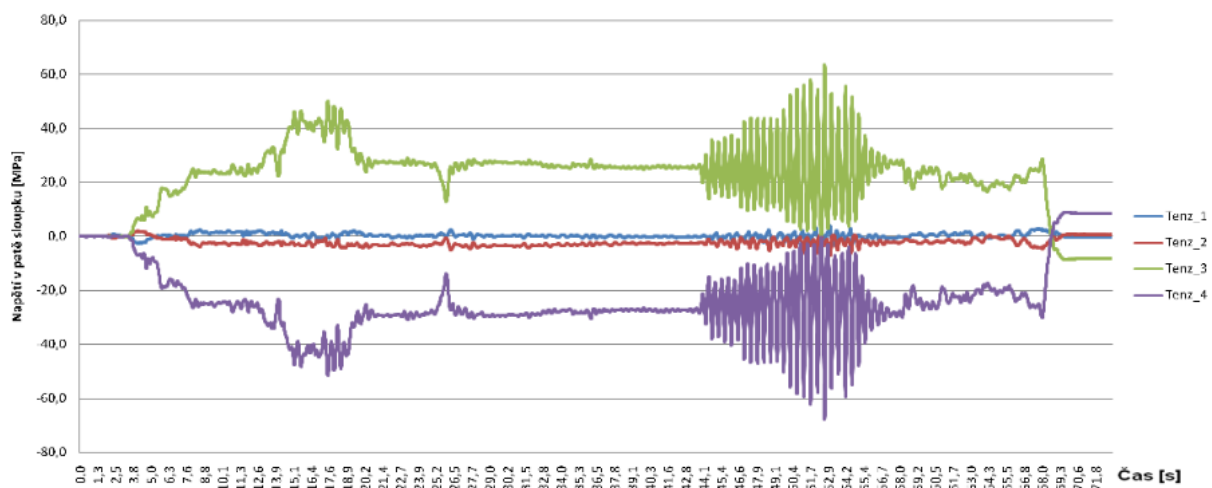
## 2.6.2.3. ZS3\_11\_1osoba\_sezeni

**Popis zatěžovacího stavu**

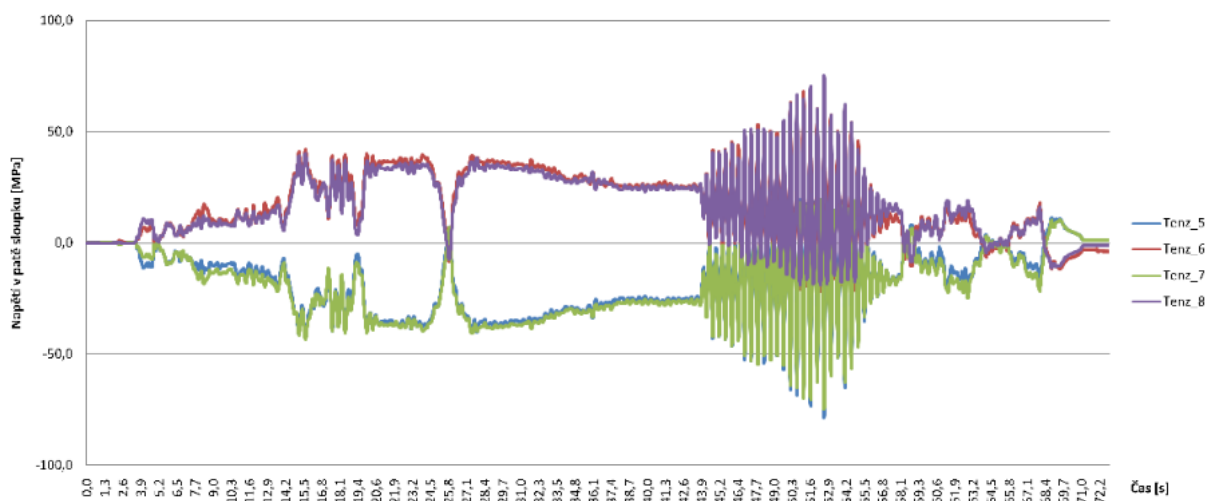
Třetí zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od jednoho člověka, který si sedne na horní lanko. V průběhu pokusu jeden člověk o váze **96,5 kg** vylezl na zábradlí, sedl si na horní lanko a v jedné chvíli se pohupoval. Člověk seděl na ocelovém lanku o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

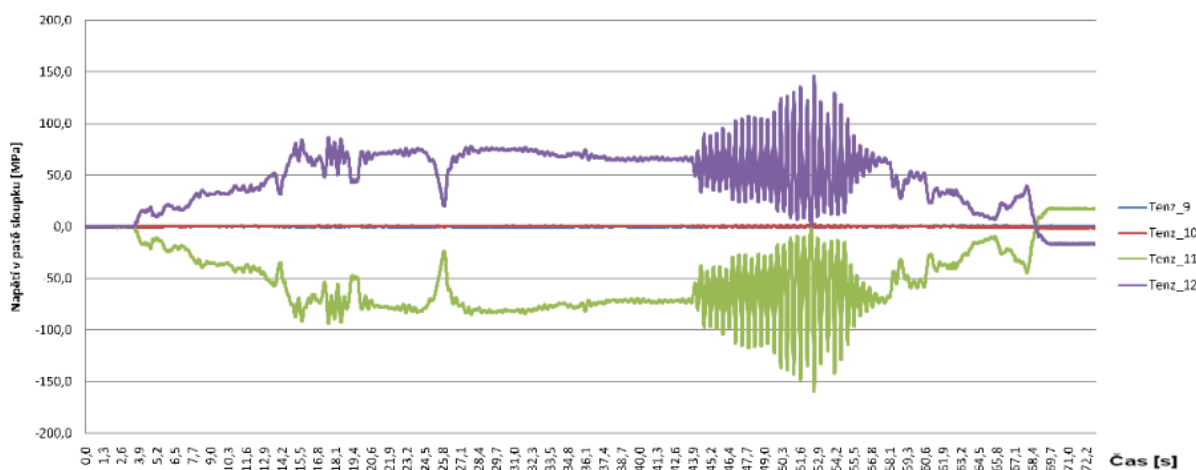
Obr. 37 Graf průběhu osová síly v lanku během 3.ZS



Obr. 38 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 3.ZS



Obr. 39 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 3.ZS



Obr. 40 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 3.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	4,069	-3,528
	Tenz_2	1,983	-6,935
	Tenz_3	<b>63,712</b>	-8,759
	Tenz_4	8,957	<b>-67,714</b>
2 IPE 80	Tenz_5	19,350	<b>-78,639</b>
	Tenz_6	73,225	-21,813
	Tenz_7	19,486	-74,905
	Tenz_8	<b>75,114</b>	-18,972
3 TR 76x5	Tenz_9	1,710	-0,808
	Tenz_10	2,907	-1,550
	Tenz_11	18,142	<b>-159,644</b>
	Tenz_12	<b>146,797</b>	-17,238

Obr. 41 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 3.ZS

Během pokusu bylo v horním lanku dosaženo dvou hlavních hodnot maximální tahové síly. Maximální statická hodnota síly, kdy člověk bez pohybu pouze seděl na lanku, byla  $F_{3ZS,max,st} = 3,12 \text{ kN}$ . Maximální dynamická hodnota síly, kdy se člověk na lanku hýbal a pohupoval, byla  $F_{3ZS,max,dyn} = 4,30 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{3ZS,fin} = 0,58 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupcu č. 3, a to  $\sigma_{3ZS,max} = 146,80 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{3ZS,min} = -159,64 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota přeřazení a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 42 Průběh zkoušky 3.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím). Střední sloupek nebyl v rámci tohoto zatěžovacího stavu tolik namáhán (lanka jím volně procházejí). Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 67,71 = 1,35 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 159,64 = 3,19 \text{ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Sedící člověk vyvolil působící sílu o hodnotě:

$$F_{Ed,3ZS} = m \times g = 96,5 \times 9,81 = 0,95 \text{ kN},$$

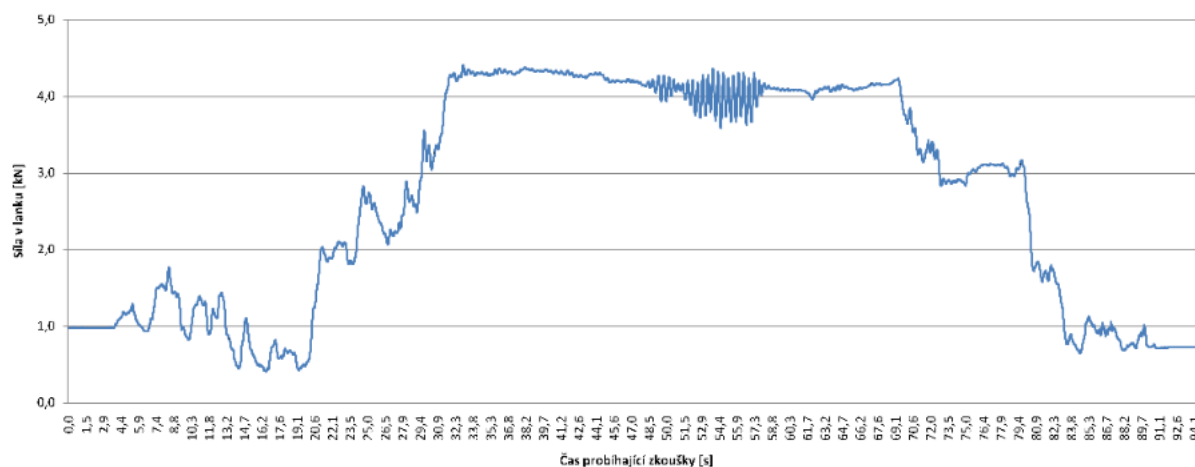
V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

#### 2.6.2.4. ZS4\_11\_3osoba\_sezeni

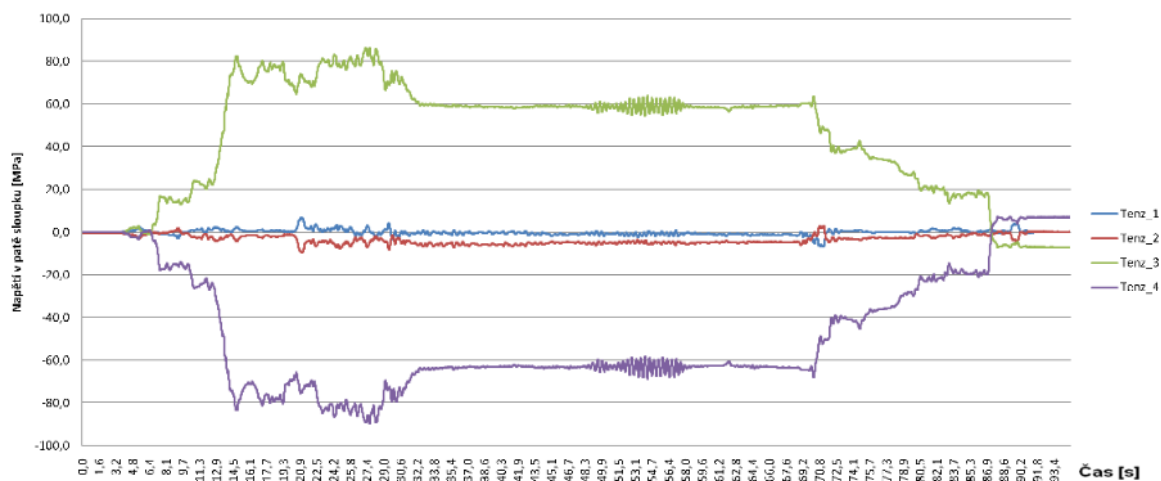
##### Popis zatěžovacího stavu

Čtvrtý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od více lidí, kteří sedí na horním lanku. V průběhu pokusu si tři lidé o celkové váze  $83,7 + 84,5 + 96,5 = 264,7 \text{ kg}$  vylezli na zábradlí, sedli si na horní lanko a v jedné chvíli se pohupovali. Seděli na ocelovém lanku o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě mezi 1. a 2. sloupkem. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

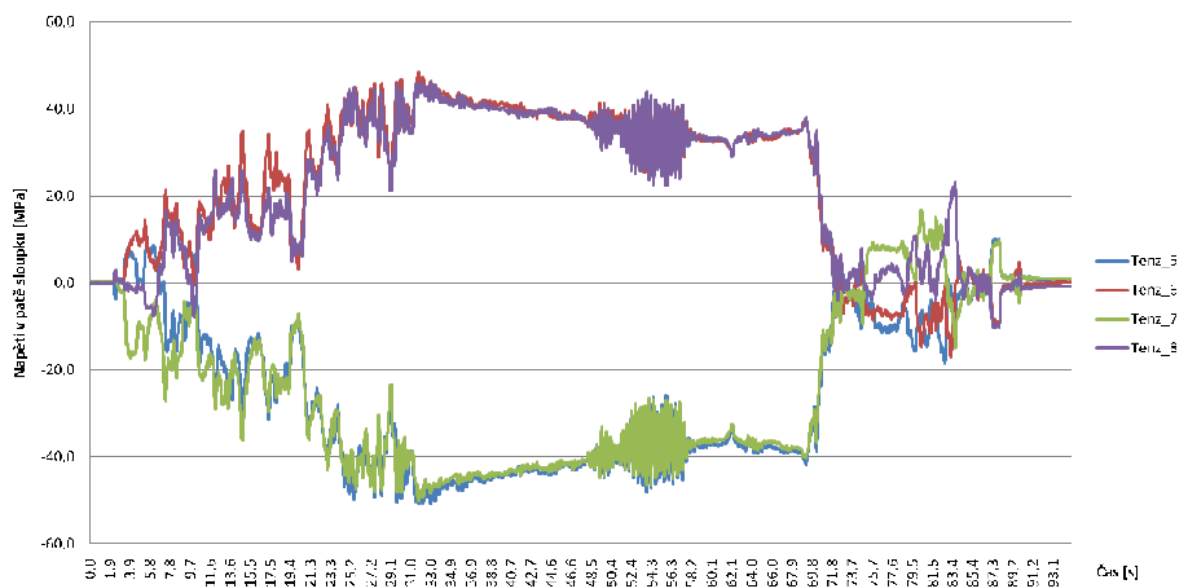
##### Výsledky zatěžovacího stavu



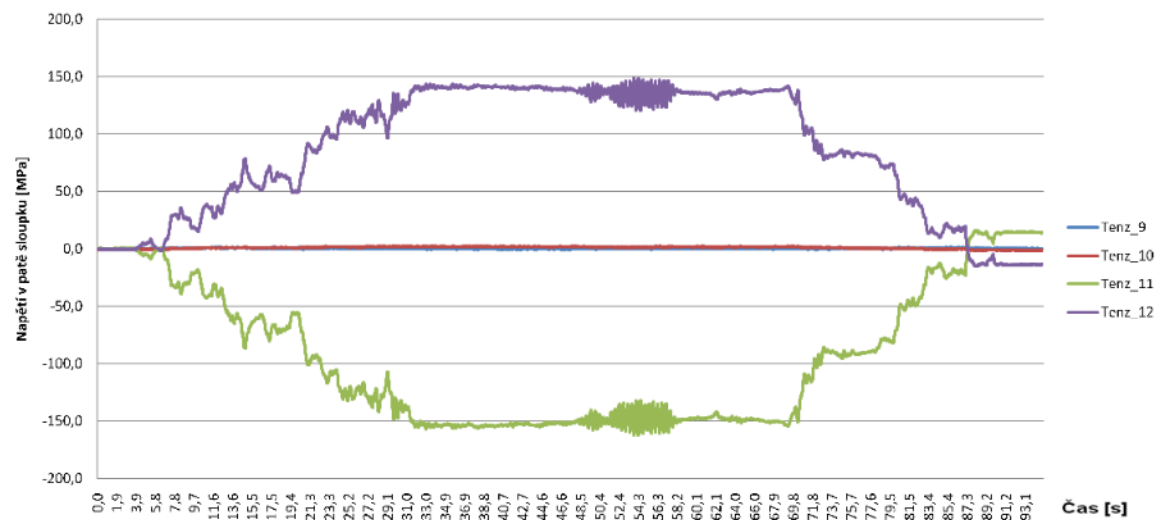
Obr. 43 Graf průběhu osově síly v lanku během 4.ZS



Obr. 44 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 4.ZS



Obr. 45 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 4.ZS



Obr. 46 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 4.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	6,885	-6,689
	Tenz_2	3,210	-9,465
	Tenz_3	<b>86,389</b>	-7,229
	Tenz_4	7,394	<b>-89,673</b>
2 IPE 80	Tenz_5	10,090	<b>-50,740</b>
	Tenz_6	48,383	-16,982
	Tenz_7	16,875	-50,153
	Tenz_8	<b>46,278</b>	-10,124
3 TR 76x5	Tenz_9	1,891	-0,530
	Tenz_10	2,636	-1,911
	Tenz_11	15,947	<b>-162,321</b>
	Tenz_12	<b>148,998</b>	-15,217

Obr. 47 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 4. ZS

Během pokusu bylo v horním lanku dosaženo dvou hlavních hodnot maximální tahové síly. Maximální statická hodnota síly, kdy všichni sedící lidé bez pohybu pouze seděli na lanku, byla  $F_{4ZS,max,st} = 4,32 \text{ kN}$ . Maximální dynamická hodnota síly, kdy se lidé na lanku hýbali a pohupovali, byla  $F_{4ZS,max,dyn} = 4,41 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_P = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{4ZS,fin} = 0,74 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupeku č. 3, a to  $\sigma_{4ZS,max} = 149,0 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{4ZS,min} = -162,32 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předeprnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace**

Obr. 48 Průběh zkoušky 4.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím). Střední sloupek nebyl v rámci tohoto zatěžovacího stavu tolik namáhán (lanka jím volně procházejí). Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 89,67 = \mathbf{1,79\,kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 162,32 = \mathbf{3,25\,kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Sedící lidé vyvodili působící sílu o hodnotě:

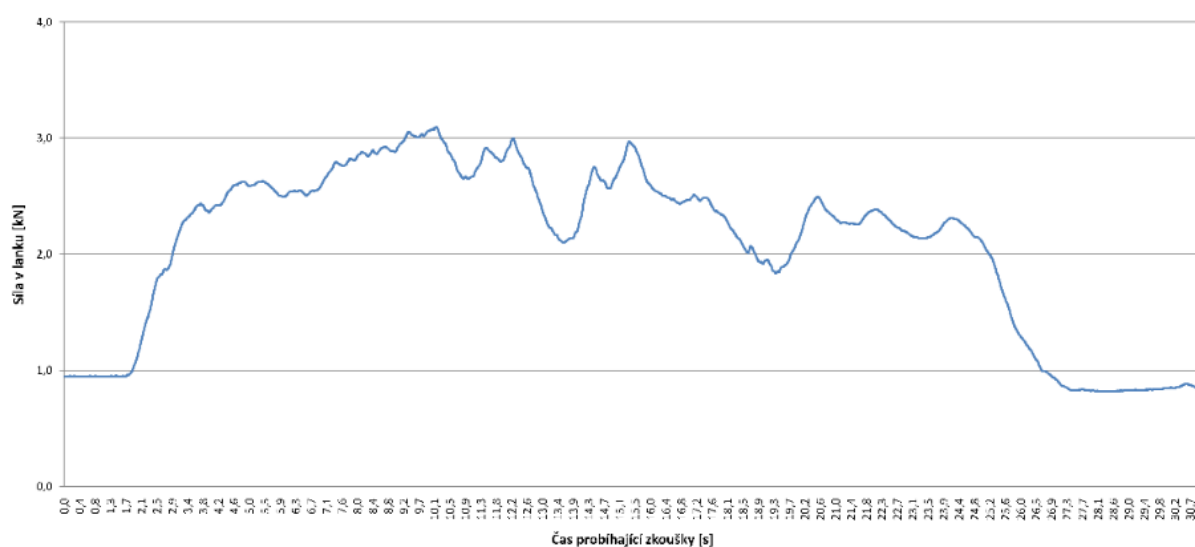
$$F_{Ed,4ZS} = m \times g = 264,7 \times 9,81 = 2,60\,kN = 1,30\,kN/bm,$$

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

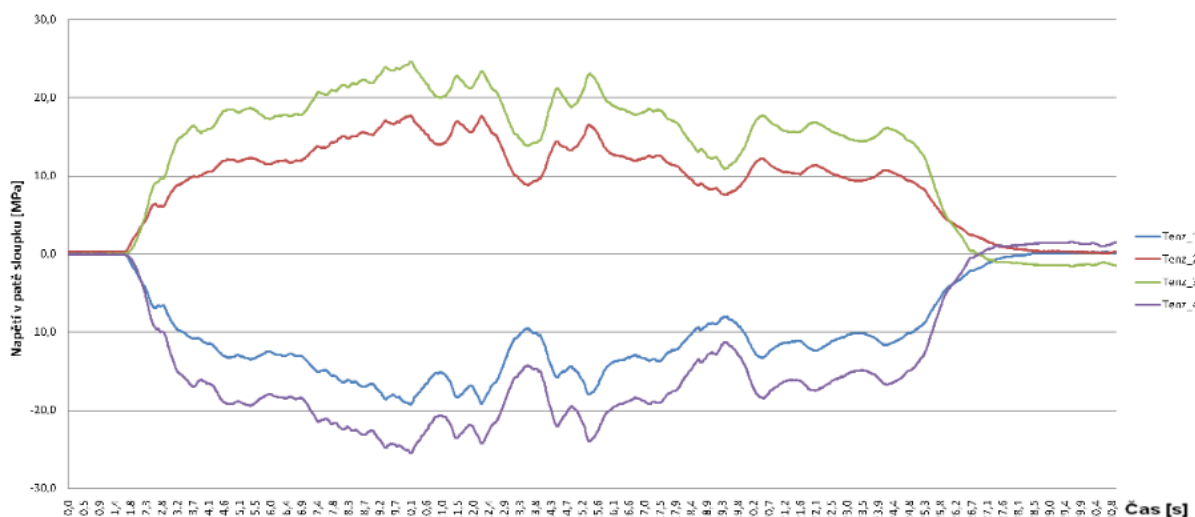
## 2.6.2.5. ZS5\_11\_1osoba\_tlaceni

**Popis zatěžovacího stavu**

Pátý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od jednoho člověka, který by se z nějakého důvodu rozhodl tlačit do zábradlí. V průběhu pokusu se jeden člověk co největší silou snažil tlačit do horního ocelového lanka o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

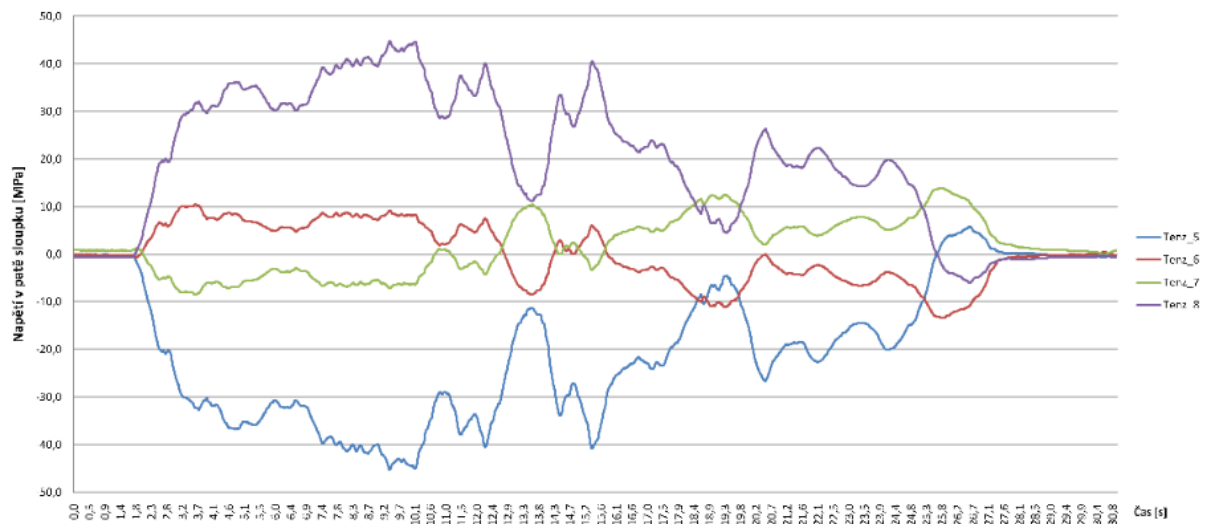
**Výsledky zatěžovacího stavu**

Obr. 49 Graf průběhu osová síly v lanku během 5.ZS

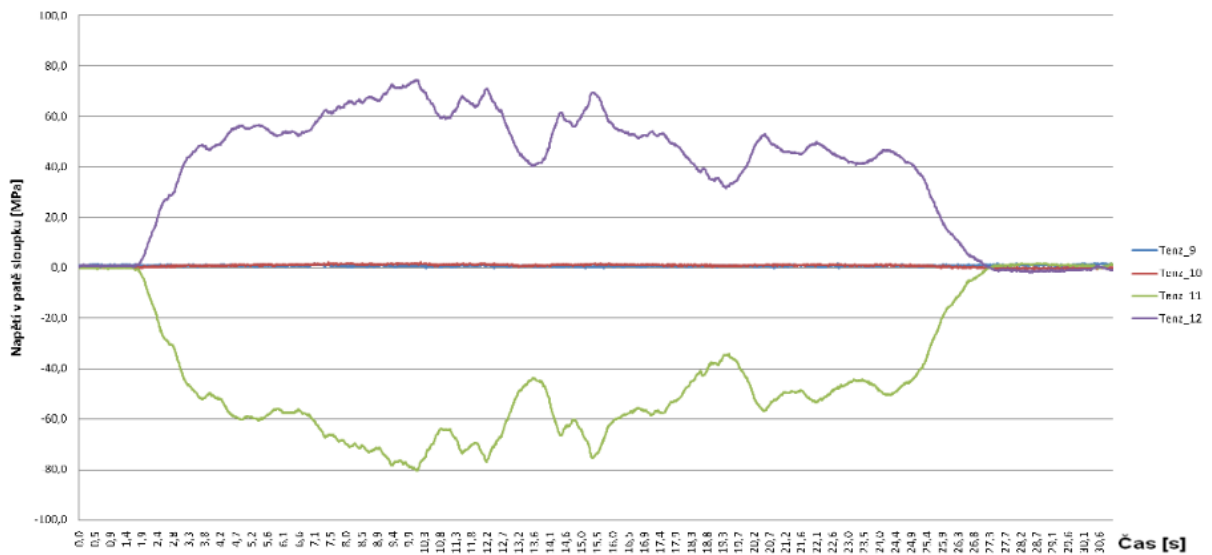


Obr. 50 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 5.ZS





Obr. 51 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 5.ZS



Obr. 52 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 5.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	0,367	-19,352
	Tenz_2	17,709	0,011
	Tenz_3	<b>24,639</b>	-55,860
	Tenz_4	1,547	<b>-25,482</b>
2 IPE 80	Tenz_5	5,934	<b>-45,093</b>
	Tenz_6	10,535	-13,219
	Tenz_7	13,804	-8,394
	Tenz_8	<b>44,881</b>	-5,989
3 TR 76x5	Tenz_9	1,852	-0,057
	Tenz_10	2,204	-0,717
	Tenz_11	1,792	<b>-80,560</b>
	Tenz_12	<b>74,660</b>	-1,971

Obr. 53 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 5. ZS

Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{5ZS,max} = 3,10\text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_P = 1,0\text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{5ZS,fin} = 0,85\text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{5ZS,max} = 74,66\text{ MPa}$  a  $\sigma_{5ZS,min} = -80,56\text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předepnutí a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 54 Průběh zkoušky 5.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek momentem  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici. Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 19,35 = \mathbf{0,39\ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 25,48 = \mathbf{0,51\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 29,34 = \mathbf{0,55\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 80,56 = \mathbf{1,61\ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Síla vyvolaná tlakem člověka se dá odvodit jako:

$$F_{Ed,5ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{0,39 + 0,51}{1,17} = \mathbf{0,77\ kN},$$

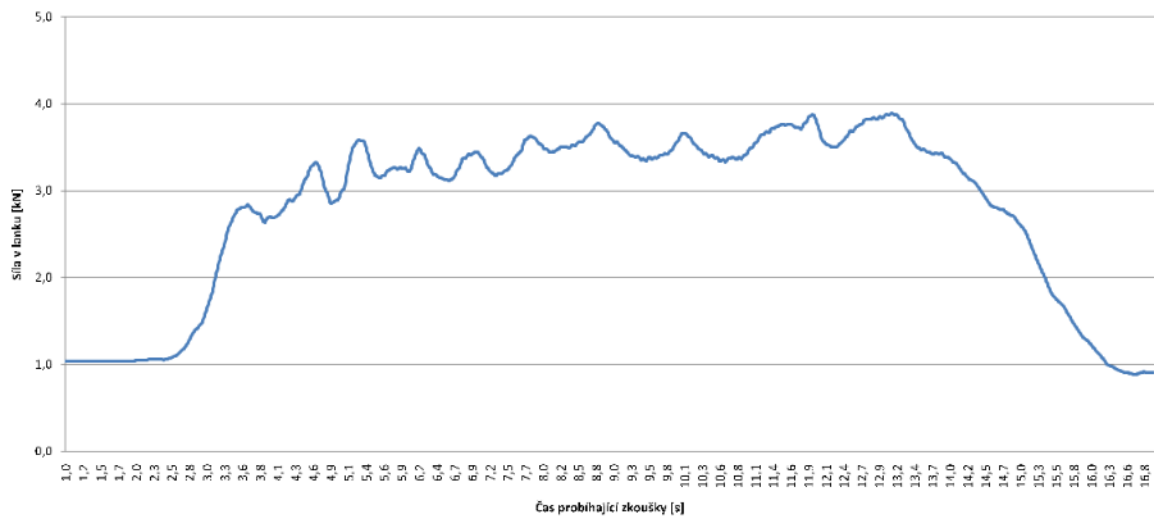
kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

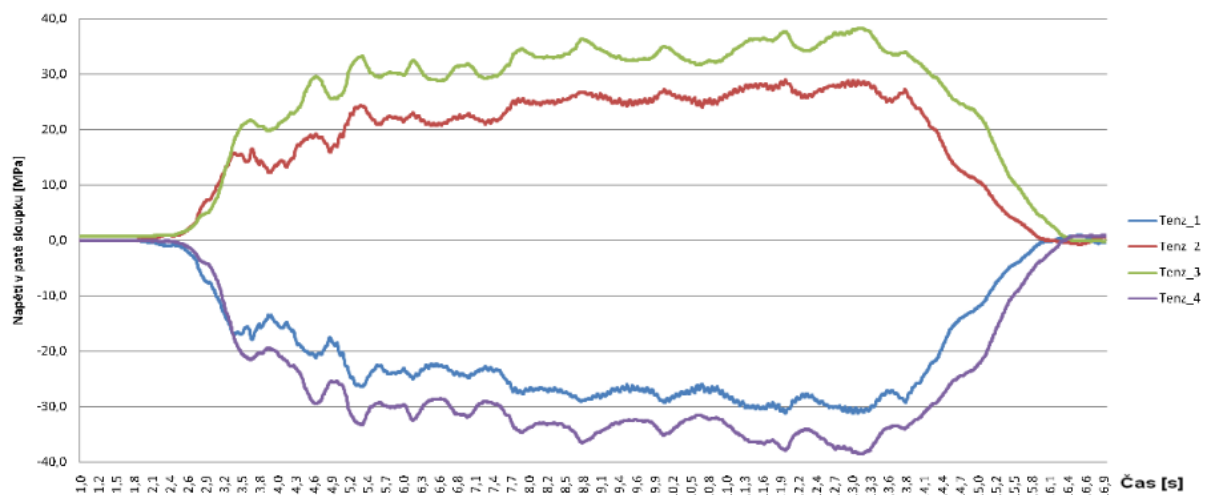
#### 2.6.2.6. ZS6\_11\_3osoba\_tlaceni

### Popis zatěžovacího stavu

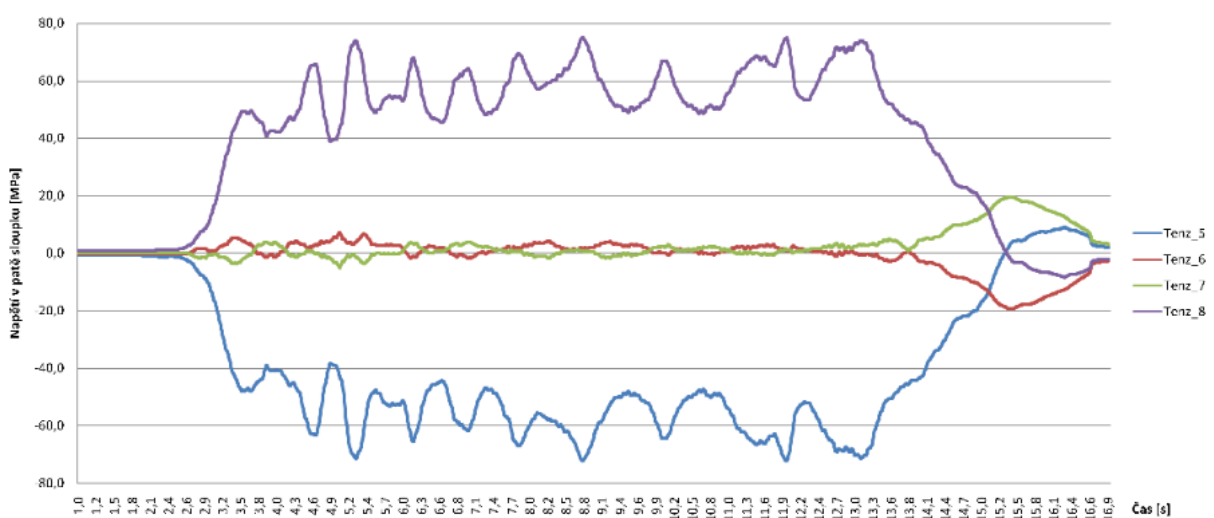
Šestý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od více lidí, kteří by se z nějakého důvodu rozhodli tlačít do zábradlí. Zároveň je tento stav simulací panického chování skupiny lidí, kteří by byli donuceni na zábradlí tlačít. V průběhu pokusu se tři lidé co největší silou snažili tlačít do horního ocelového lanka o průměru  $\varnothing = 8\ mm$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100\ mm$  nad patními plechy sloupků a bylo předeprnuté na sílu  $F_p = 1,0\ kN$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

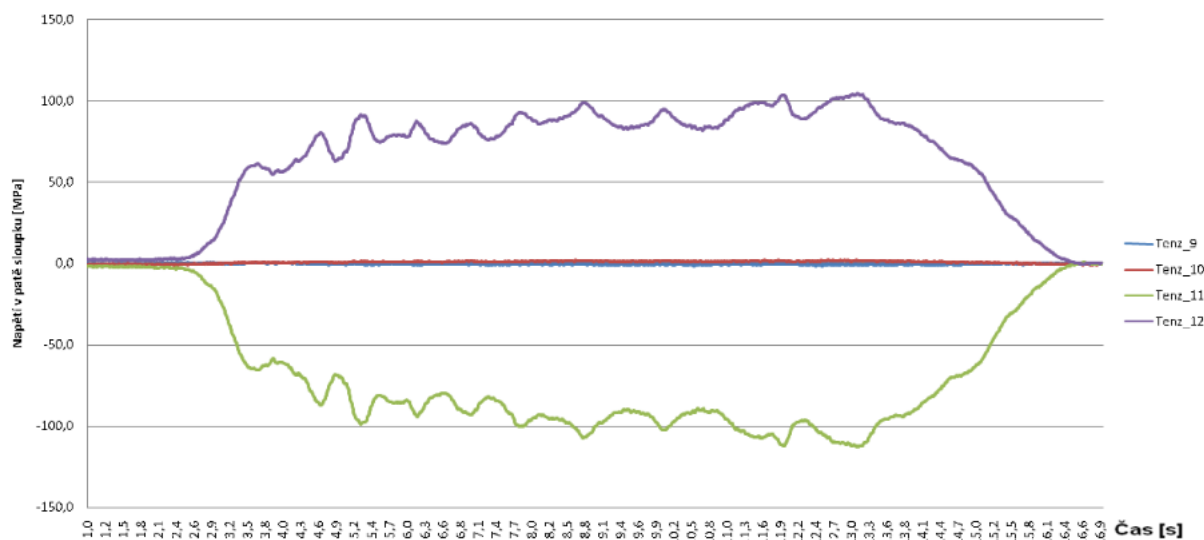
Obr. 55 Graf průběhu osově síly v lanku během 6.ZS



Obr. 56 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 6.ZS



Obr. 57 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 6.ZS



Obr. 58 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 6.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	0,939	-31,254
	Tenz_2	28,951	-0,811
	Tenz_3	<b>38,246</b>	-0,357
	Tenz_4	1,045	<b>-38,472</b>
2 IPE 80	Tenz_5	8,985	<b>-72,182</b>
	Tenz_6	7,304	-19,317
	Tenz_7	19,633	-4,971
	Tenz_8	<b>75,065</b>	-8,260
3 TR 76x5	Tenz_9	0,990	-1,431
	Tenz_10	2,469	-0,847
	Tenz_11	0,987	<b>-113,048</b>
	Tenz_12	<b>104,949</b>	-0,716

Obr. 59 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 6. ZS

Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{6ZS,max} = 3,89 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{6ZS,fin} = 0,91 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{6ZS,max} = 104,95 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{6ZS,min} = -113,05 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předeprnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace**

Obr. 60 Průběh zkoušky 6.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek momentem  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici. Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 31,25 = \mathbf{0,63\,kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 38,47 = \mathbf{0,77\,kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 47,35 = \mathbf{0,88\,kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 113,05 = \mathbf{2,26\,kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Síla vyvolaná tlakem lidí se dá odvodit jako:

$$F_{Ed,6ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{0,63 + 0,88}{1,17} = \mathbf{1,30\,kN} = \mathbf{0,65\,kN/bm},$$

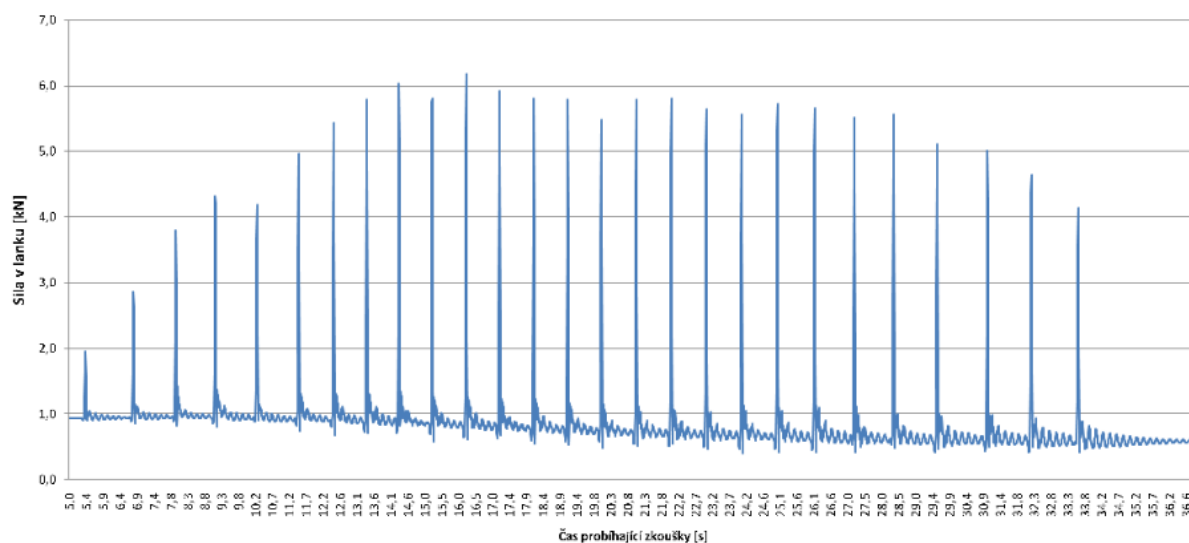
kde  $h = 1,17\,m$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

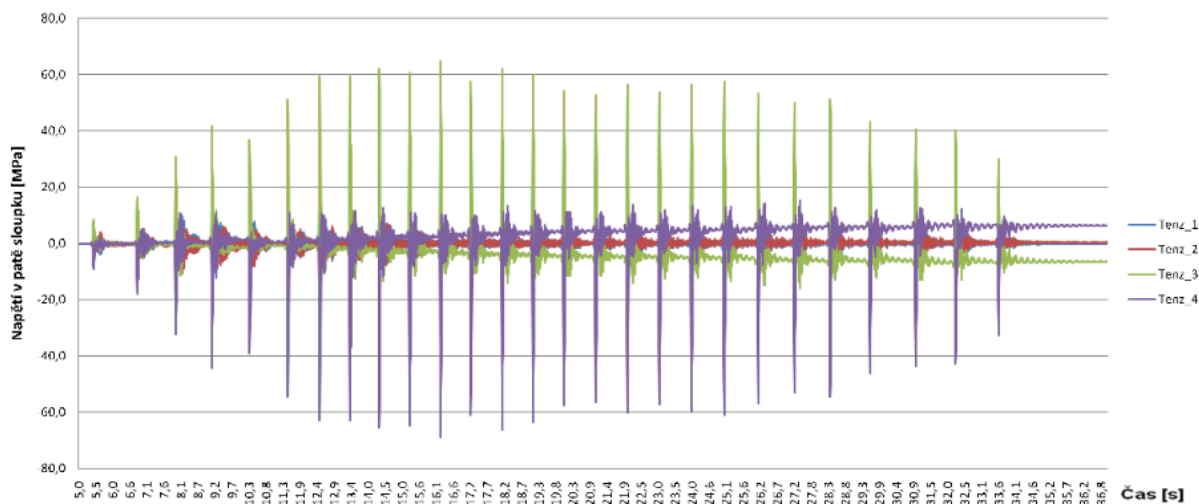
## 2.6.2.7. ZS7\_11\_1osoba\_vandalizmus

**Popis zatěžovacího stavu**

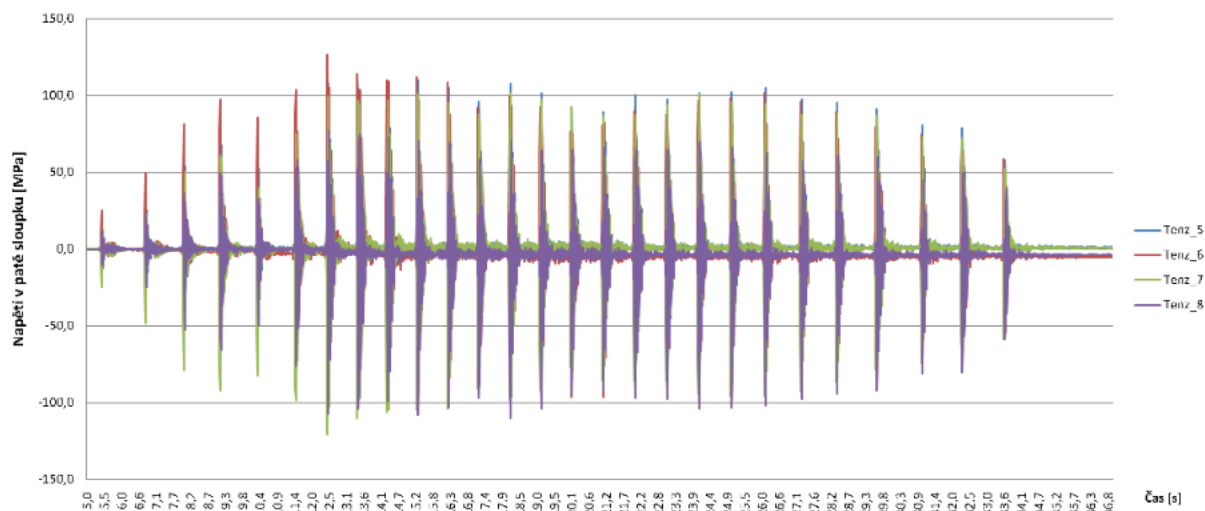
Sedmý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od vandalizmu v podobě mlácení tyčí do výplně zábradlí. V rámci simulace tohoto chování bylo co největší silou mláceno do horního ocelového lanka o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  páčidlem, v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

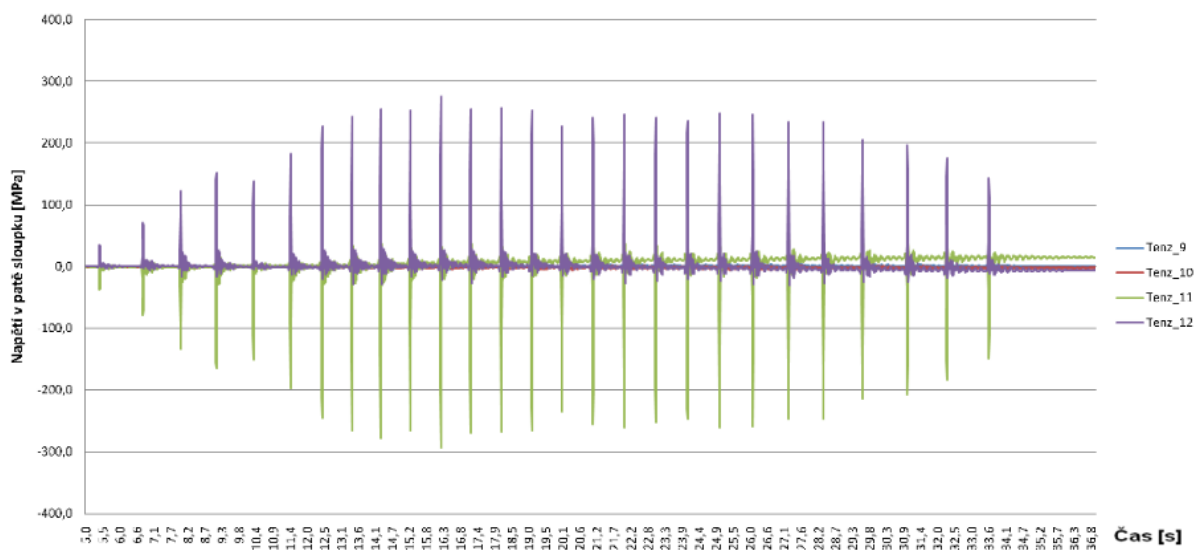
Obr. 61 Graf průběhu osová síly v lanku během 7.ZS



Obr. 62 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 7.ZS



Obr. 63 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 7.ZS



Obr. 64 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 7.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	51,100	-12,788
	Tenz_2	13,582	-57,959
	Tenz_3	<b>64,941</b>	-15,975
	Tenz_4	15,487	<b>-68,882</b>
2 IPE 80	Tenz_5	110,001	<b>-82,099</b>
	Tenz_6	126,296	-107,514
	Tenz_7	101,599	-120,693
	Tenz_8	<b>77,590</b>	-110,113
3 TR 76x5	Tenz_9	8,130	-7,495
	Tenz_10	7,598	-9,509
	Tenz_11	42,079	<b>-293,247</b>
	Tenz_12	<b>275,846</b>	-30,648

Obr. 65 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 7. ZS



Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{7ZS,max} = 6,18 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{7ZS,fin} = 0,58 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{7ZS,max} = 275,85 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{7ZS,min} = -293,25 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předepnutí a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 66 Průběh zkoušky 7.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že během nárazu se sloupky č. 1 a 2 chovaly čistě elasticky. Naměřené napětí ve sloupku č. 3 ale překročilo mez kluzu. Ocel krátce plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí, resp. zbytková deformace. Ovšem v rámci tohoto zatěžovacího stavu měly tyto veličiny malé hodnoty.

Krajní sloupky byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek momentem  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 57,96 = 1,16 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 68,88 = 1,38 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 118,15 = 2,20 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 293,25 = 6,81 \text{ kNm}$

Maximální hodnota napětí, která se může v této oceli objevit, je hodnota meze kluzu. Po jejím dosažení už reálné napětí neroste a deformace se zvyšuje nelineárně bez závislosti na napětí. Je nutné dodat, že hodnoty ohybových momentů napsané výše, kdy je mez kluzu překročena, nejsou skutečné hodnoty momentů, které se ve sloupcích vyskytují. Reálné hodnoty jsou tedy hodnoty plastických únosností sloupků, viz výše.

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu od nárazů páčidlem překročila plastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se v tomto směru deformoval.

$$M_{Ed,z,3} = 6,81 \text{ kNm} > M_{Rd,pl}^{IPE} = 5,46 \text{ kNm}$$

Mláčení páčidlem způsobilo maximální působící sílu:

$$F_{Ed,7ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,16 + 2,20}{1,17} = 2,87 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,17 \text{ m}$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

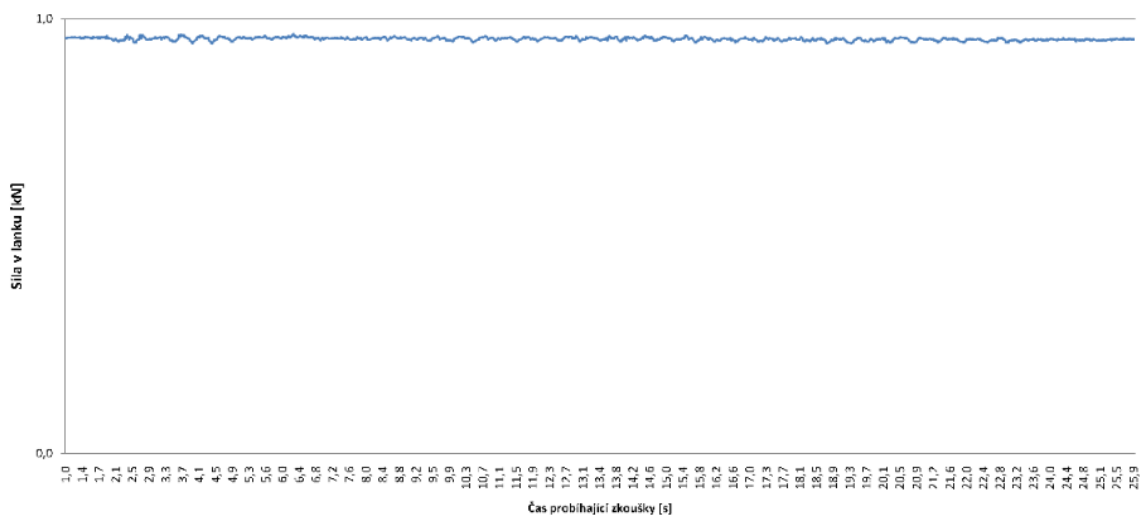
V tomto zatěžovacím stavu nevyhověl krajní sloupek č. 3, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.

#### 2.6.2.8. ZS8\_11\_Iosoba\_vandalizmus\_lomcovani

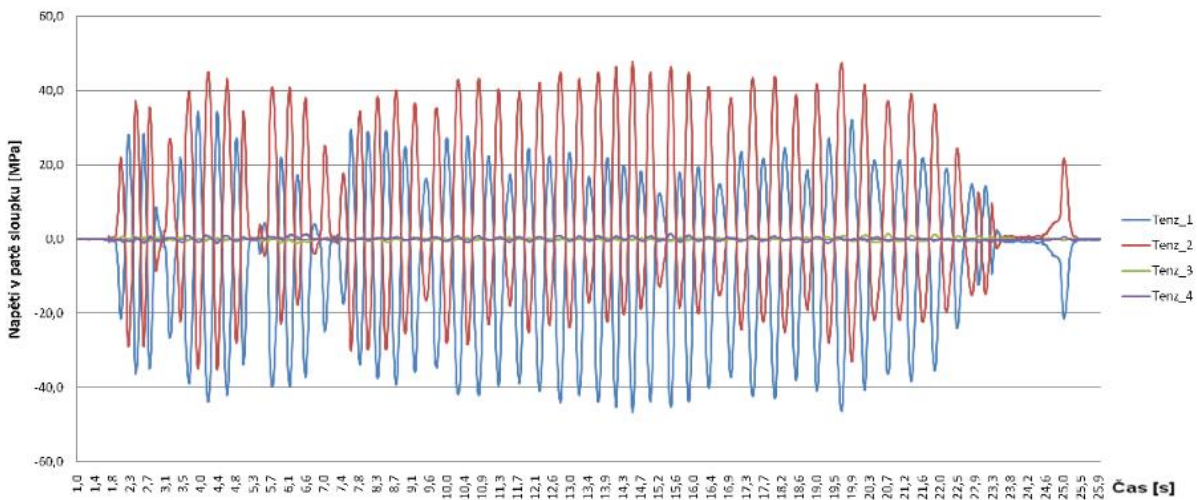
##### Popis zatěžovacího stavu

Osmý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od vandalizmu v podobě pokusu o vyvrácení krajního sloupku. V rámci simulace tohoto chování bylo co největší silou lomcováno s krajním, ukotveným sloupkem, směrem kolmo na zábradlí. Horní lanko zábradlí mělo průměr  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  a sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

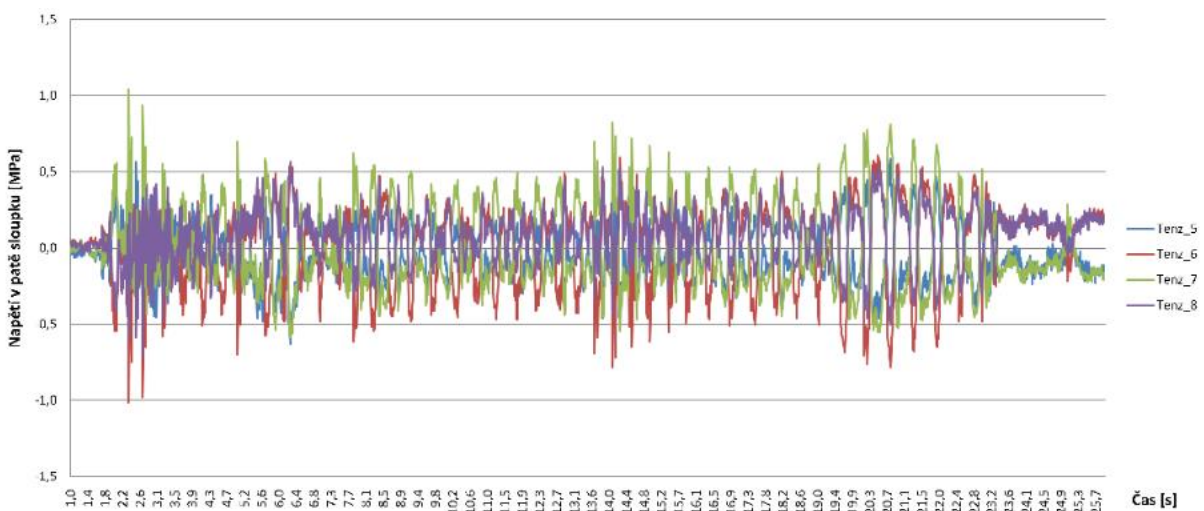
### Výsledky zatěžovacího stavu



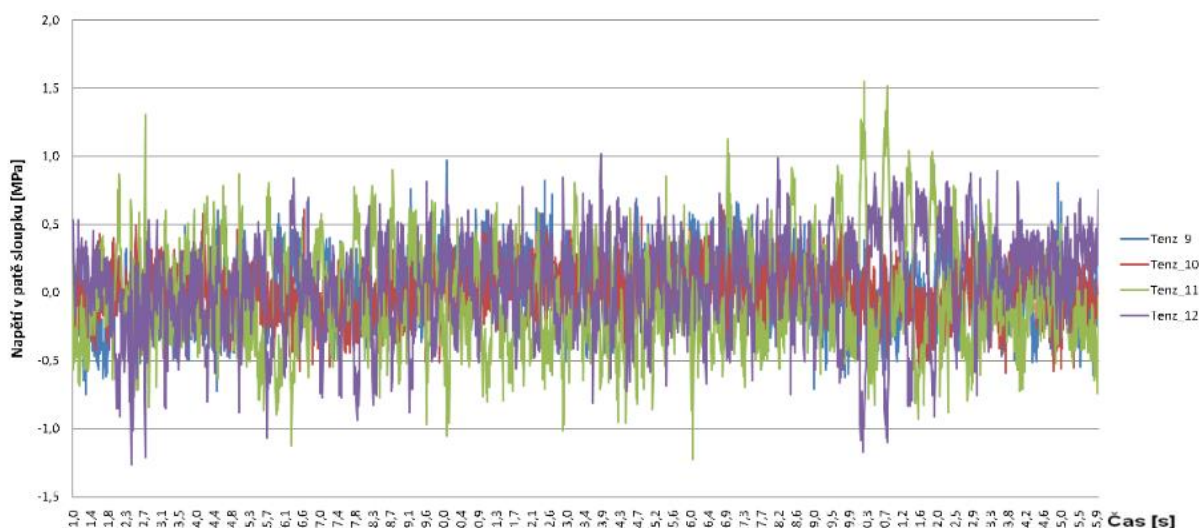
Obr. 67 Graf průběhu osově síly v lanku během 8.ZS



Obr. 68 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 8.ZS



Obr. 69 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 8.ZS



Obr. 70 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 8.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	34,306	<b>-46,760</b>
	Tenz_2	<b>47,903</b>	-35,165
	Tenz_3	1,451	-0,994
	Tenz_4	1,449	-1,153
2 IPE 80	Tenz_5	0,756	-0,632
	Tenz_6	0,611	<b>-1,014</b>
	Tenz_7	<b>1,041</b>	-0,584
3 TR 76x5	Tenz_8	0,568	-0,715
	Tenz_9	0,977	-0,853
	Tenz_10	0,649	-0,646
	Tenz_11	<b>1,550</b>	-1,224
	Tenz_12	1,019	<b>-1,265</b>

Obr. 71 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 8. ZS

Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{8ZS,max} = 1,0 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{8ZS,fin} = 0,95 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 1, tedy lomcovaným sloupkem, a to  $\sigma_{8ZS,max} = 47,90 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{8ZS,min} = -46,76 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předeprnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace**

Obr. 72 Průběh zkoušky 8.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Lomcovaný, krajní sloupek byl během experimentu vystaven extrémním ohybovým momentem ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Ostatní sloupky byly působením lomcování téměř nezatíženy.

Hodnota momentu v lomcovaném sloupku je:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 47,90 = \mathbf{0,96\ kNm}$

Síla lomcování se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,8ZS} = \frac{M_{Ed,y,1}}{h} = \frac{0,96}{1,17} = \mathbf{0,82\ kN},$$

kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

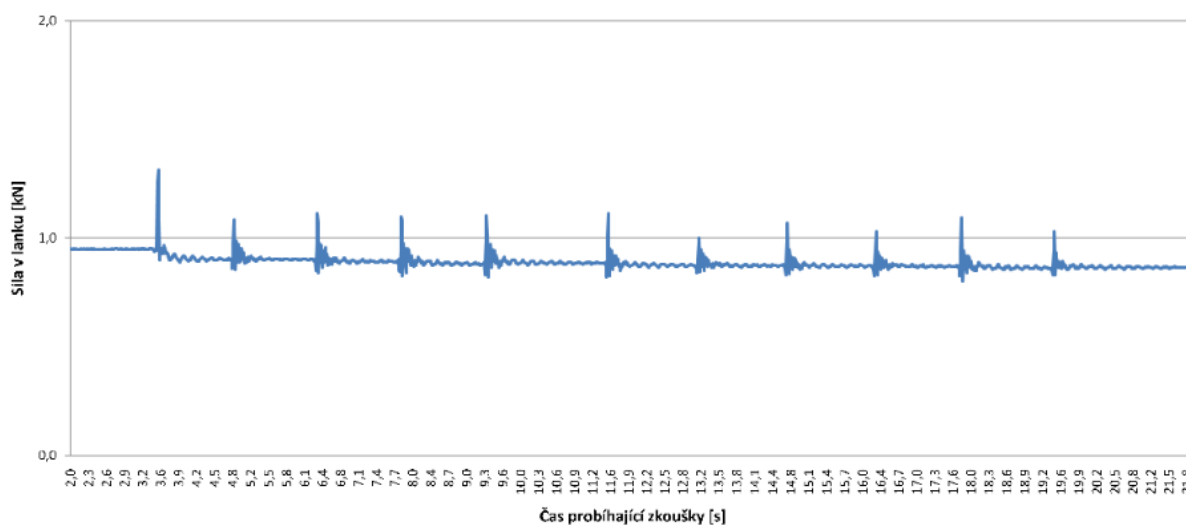
Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

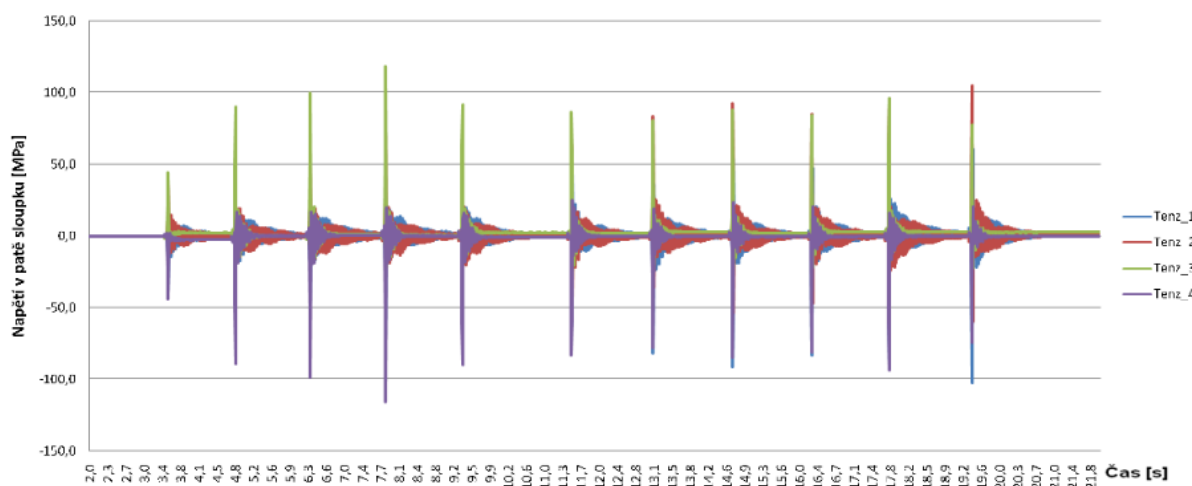
## 2.6.2.9. ZS9\_11\_1osoba\_vandalizmus\_mláčení

**Popis zatěžovacího stavu**

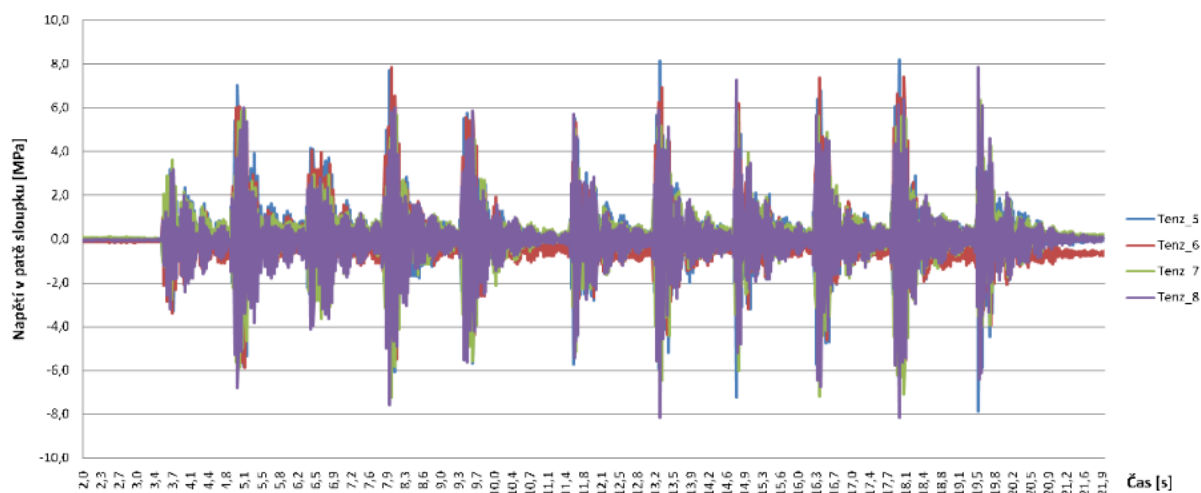
Devátý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od vandalizmu v podobě mláčení tyčí do krajního sloupku. V rámci simulace tohoto chování bylo co největší silou mláceno z boku páčidlem do krajního, ukotveného sloupku. Horní lanko zábradlí mělo průměr  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  a sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a bylo předeprnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

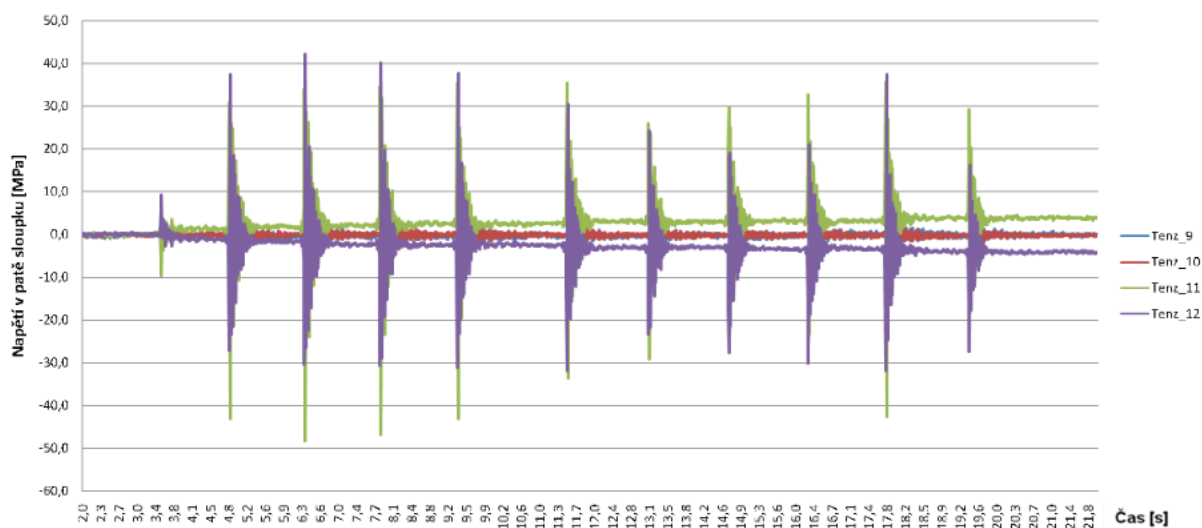
Obr. 73 Graf průběhu osově síly v lanku během 9.ZS



Obr. 74 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 9.ZS



Obr. 75 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 9.ZS



Obr. 76 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 9.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	60,636	-102,531
	Tenz_2	104,967	-59,524
	Tenz_3	<b>118,222</b>	-27,221
	Tenz_4	25,021	<b>-115,576</b>
2 IPE 80	Tenz_5	8,198	<b>-7,863</b>
	Tenz_6	7,863	-5,872
	Tenz_7	6,339	-7,239
	Tenz_8	<b>7,842</b>	-8,173
3 TR 76x5	Tenz_9	2,420	-2,613
	Tenz_10	2,809	-2,653
	Tenz_11	35,821	<b>-48,416</b>
	Tenz_12	<b>42,131</b>	-31,985

Obr. 77 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 9. ZS

Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{9ZS,max} = 1,32 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{9ZS,fin} = 0,86 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 1, a to  $\sigma_{9ZS,max} = 118,22 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{9ZS,min} = -115,58 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předepnutí a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 78 Průběh zkoušky 9.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Nejvíce zatížený, krajní sloupek byl během experimentu vystaven extrémním ohybovým momentem ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a ve směru  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím). Sloupek č. 3 byl zatížen extrémním ohybovým momentem ve směru  $M_z$ . Sloupek č. 2 byl mlácením do sloupku č. 1 téměř nezatížen.

Hodnoty momentů v krajních sloupcích jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 104,97 = 2,10 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 118,22 = 2,36 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 48,42 = 0,97 \text{ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 1 ve směru rovnoběžným se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

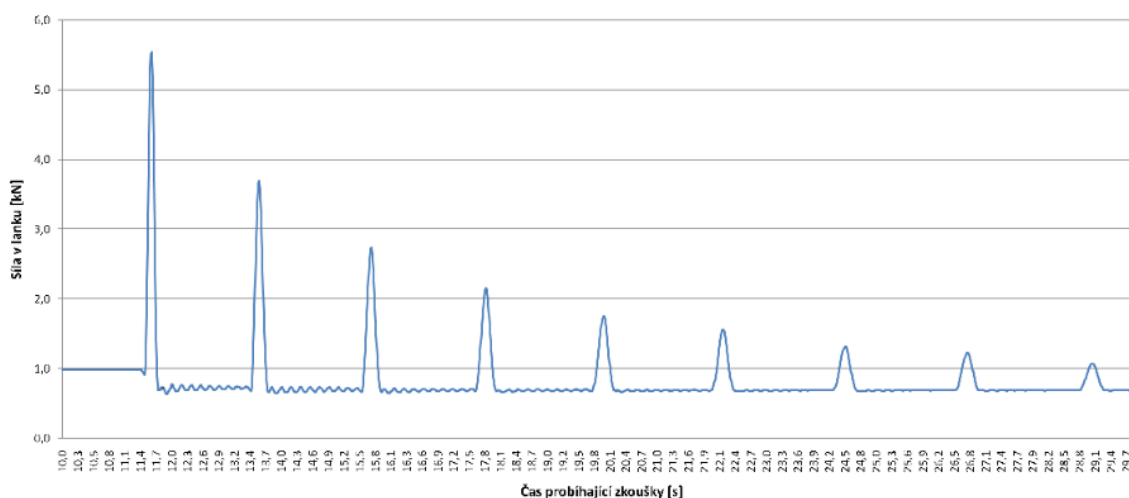
V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.



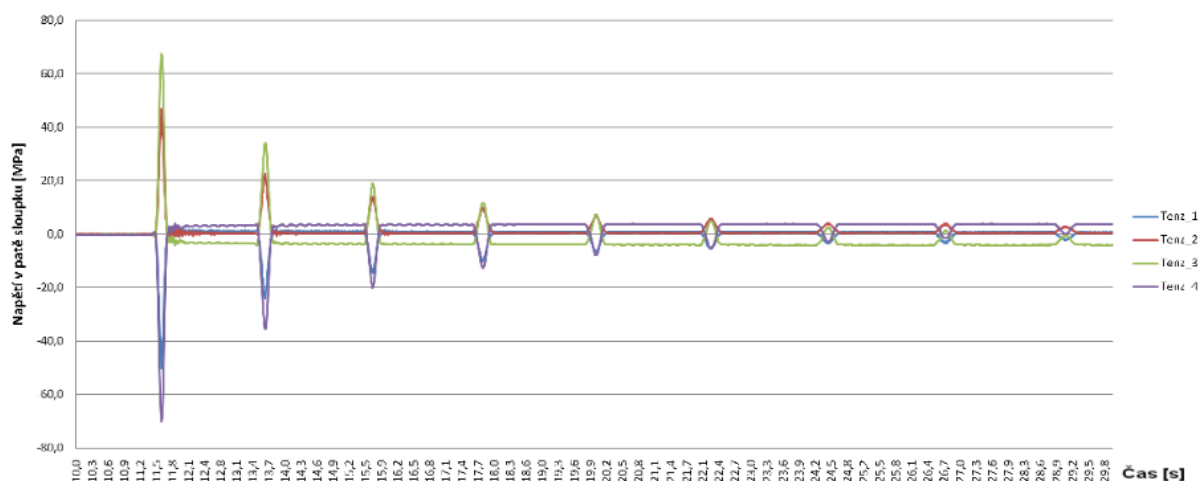
## 2.6.2.10. ZS10\_11\_pytel

**Popis zatěžovacího stavu**

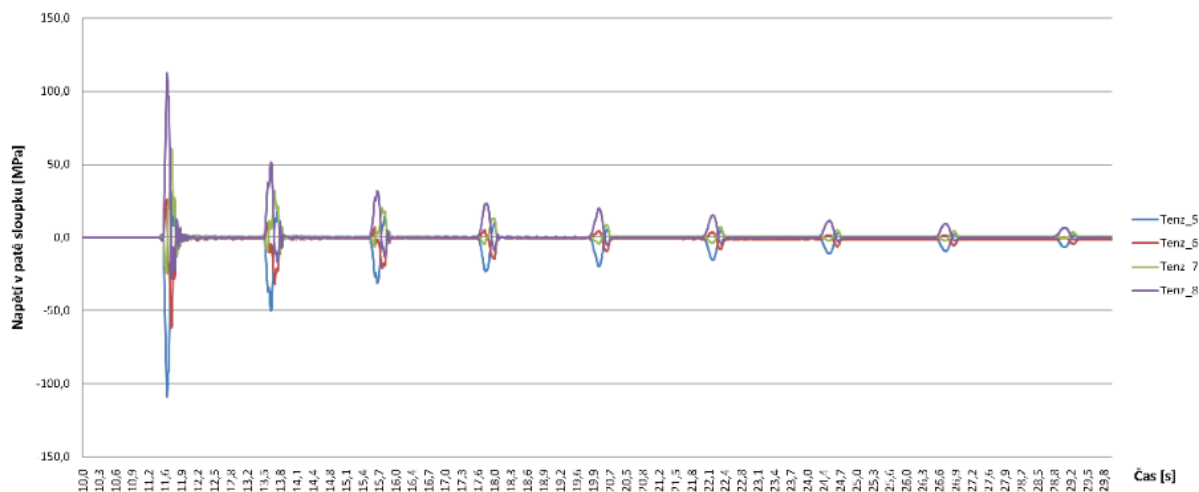
Desátý zatěžovací stav vystavil zábradlí účinkům zatížení od nárazu zkušebním pytlek podle ČSN 74 3305. Pytel se zhoupnul do zábradlí z výšky 510 mm nad horním lankem do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

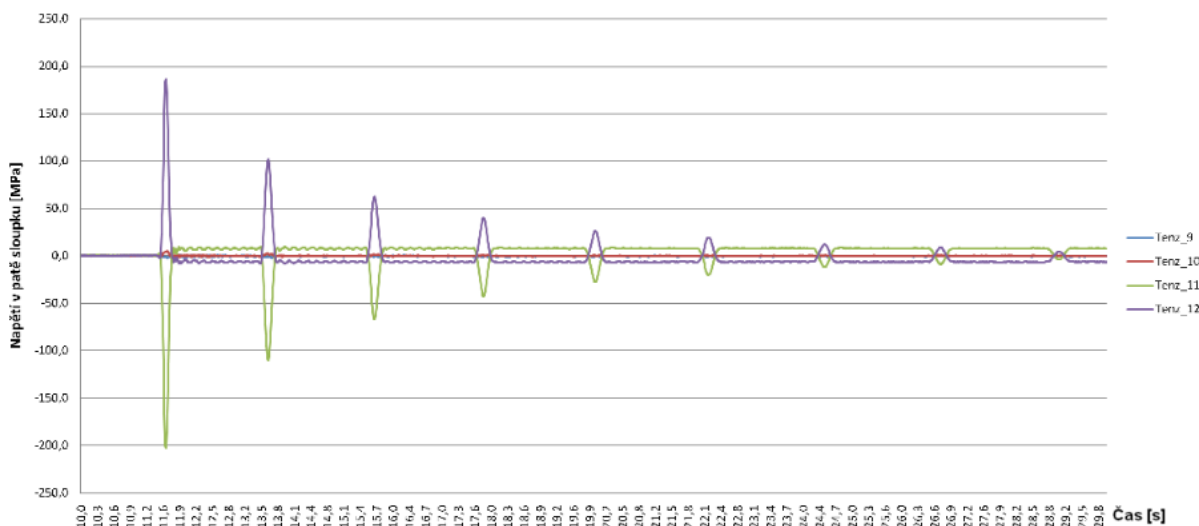
Obr. 79 Graf průběhu osově síly v lanku během 10.ZS



Obr. 80 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 10.ZS



Obr. 81 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 10.ZS



Obr. 82 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 10.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	2,376	-50,393
	Tenz_2	46,894	-1,119
	Tenz_3	<b>67,657</b>	-4,128
	Tenz_4	4,227	<b>-70,087</b>
2 IPE 80	Tenz_5	31,064	<b>-109,118</b>
	Tenz_6	26,004	-61,788
	Tenz_7	60,987	-24,499
	Tenz_8	<b>112,333</b>	-28,345
3 TR 76x5	Tenz_9	1,122	-2,491
	Tenz_10	4,916	-1,418
	Tenz_11	9,327	<b>-202,259</b>
	Tenz_12	<b>186,453</b>	-8,380

Obr. 83 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 10. ZS

Během zkoušky bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{10ZS,max} = 5,54 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{10ZS,fin} = 0,70 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{10ZS,max} = 186,45 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{10ZS,min} = -202,26 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se vyměnilo horní ocelové lanko za pevné madlo o profilu UPE 80.

### Fotodokumentace



Obr. 84 Průběh zkoušky 10.ZS



Obr. 85 Průběh zkoušky 10.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 50,39 = \mathbf{1,00\ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 70,09 = \mathbf{1,40\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 86,66 = \mathbf{1,61\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 4,92 = \mathbf{0,10\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 202,26 = \mathbf{4,05\ kNm}$ .

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžným se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Velikost nárazové síly od pytle se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,10zS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,00 + 1,61}{1,17} = \mathbf{2,23\ kN},$$

kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

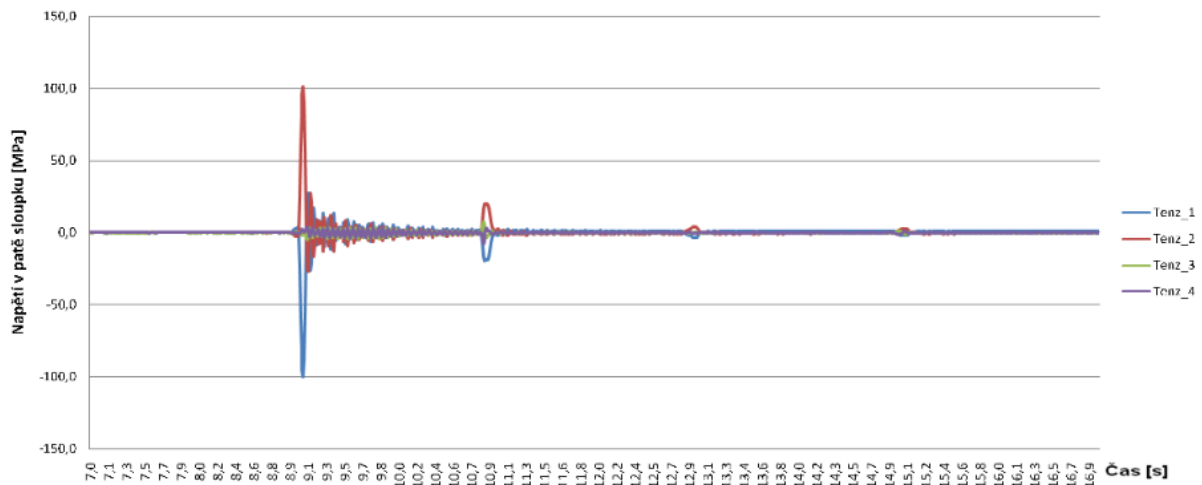
V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

#### 2.6.2.11. ZS11\_PM\_pytel

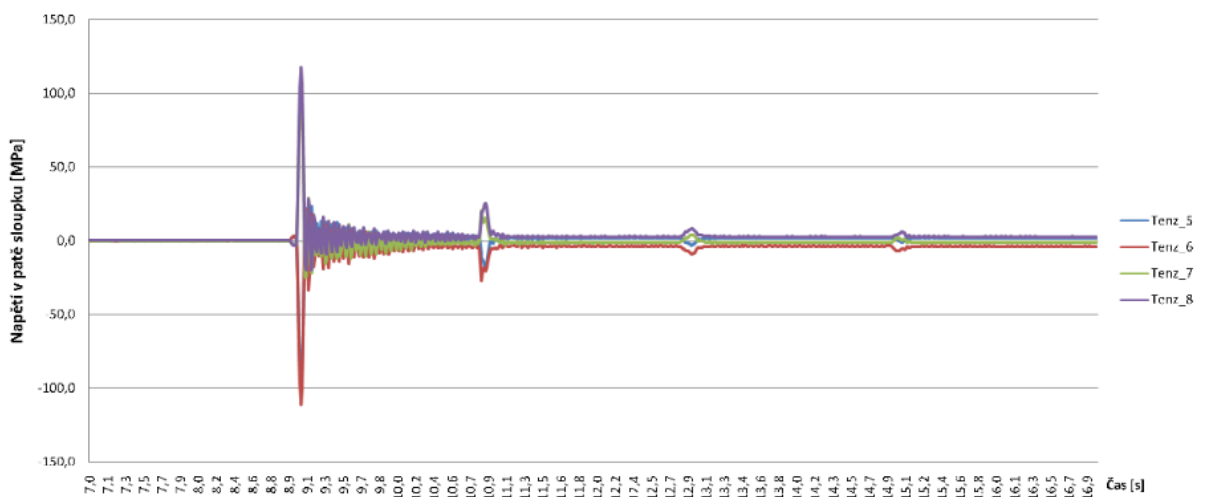
### Popis zatěžovacího stavu

Jedenáctý zatěžovací stav vystavil zábradlí účinkům zatížení od nárazu zkušebním pytle podle ČSN 74 3305. Pytel se zhouplil do zábradlí z výšky 510 mm nad horním madlem o profilu UPE 80 v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů TR 76x5 a IPE 80. Horní madlo bylo ve výšce  $h = 1100\ mm$  nad patními plechy sloupků. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

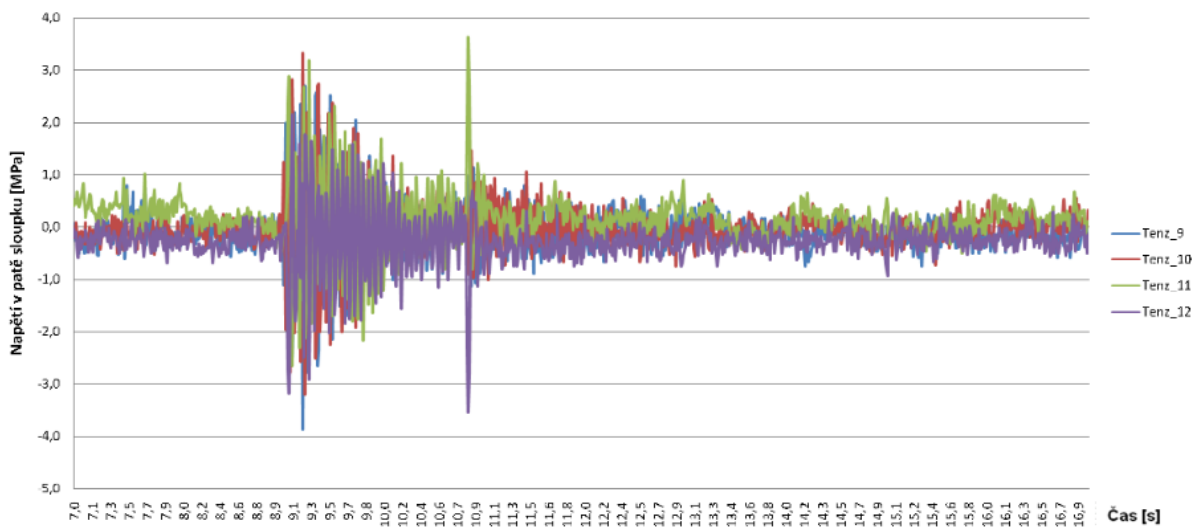
### Výsledky zatěžovacího stavu



Obr. 86 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 11.ZS



Obr. 87 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 11.ZS



Obr. 88 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 11.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	27,297	<b>-100,226</b>
	Tenz_2	<b>101,351</b>	-26,981
	Tenz_3	7,566	-4,635
	Tenz_4	3,954	-7,673
2 IPE 80	Tenz_5	23,364	-98,154
	Tenz_6	21,543	<b>-110,826</b>
	Tenz_7	102,200	-24,848
	Tenz_8	<b>117,802</b>	-20,089
3 TR 76x5	Tenz_9	2,694	<b>-3,864</b>
	Tenz_10	3,321	-3,197
	Tenz_11	<b>3,623</b>	-2,649
	Tenz_12	2,144	-3,539

Obr. 89 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 11. ZS

Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 2, a to  $\sigma_{11ZS,max} = 117,80 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{11ZS,min} = -110,83 \text{ MPa}$ .

### Fotodokumentace



Obr. 90 Průběh zkoušky 11.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$ . Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 101,35 = \mathbf{2,03\ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 7,67 = \mathbf{0,15\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 110,06 = \mathbf{2,05\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 3,86 = \mathbf{0,08\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 3,62 = \mathbf{0,07\ kNm}$ .

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 2 ve směru kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Velikost nárazové síly od pytle se dá odvodit způsobem:

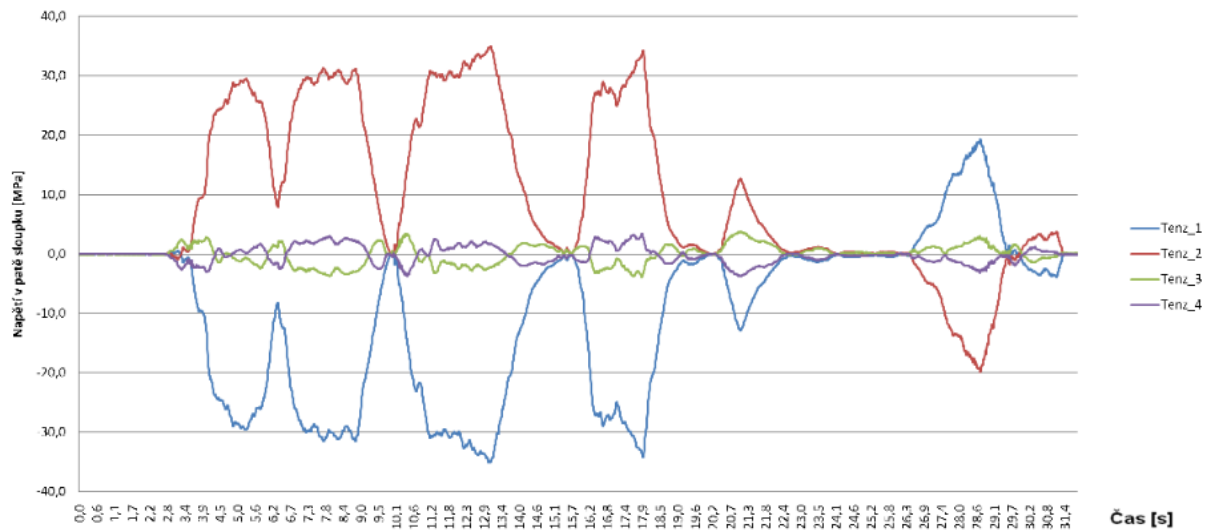
$$F_{Ed,11ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{2,03 + 2,05}{1,17} = \mathbf{3,49\ kN},$$

kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního pevného madla od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

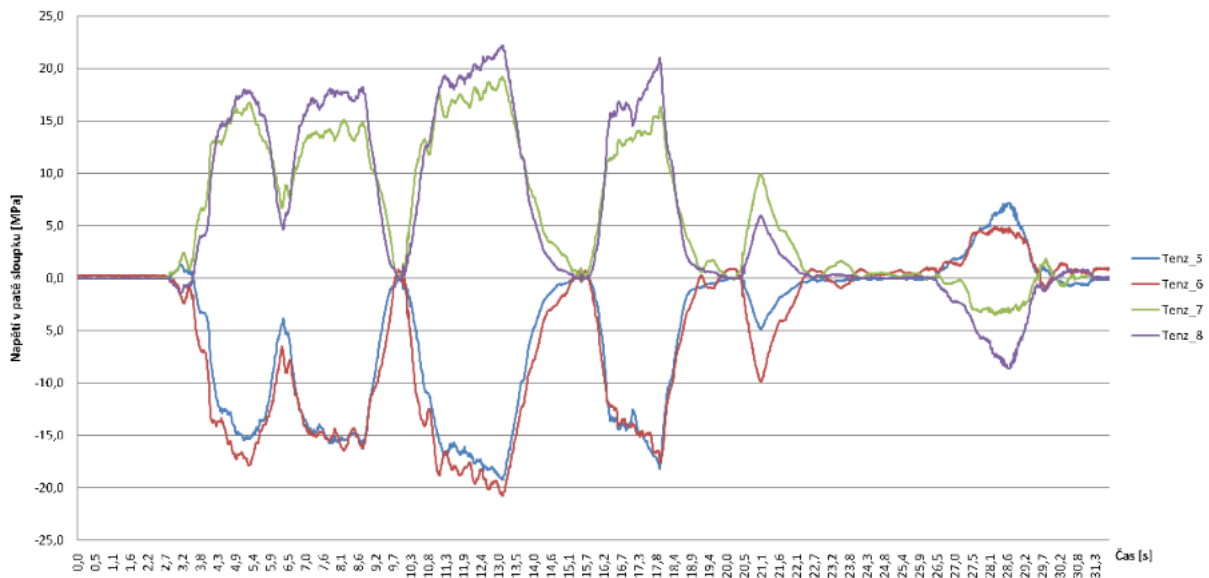
V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

**2.6.2.12. ZS12\_PM\_1osoba\_tlaceni****Popis zatěžovacího stavu**

Dvanáctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od jednoho člověka, který by se z nějakého důvodu rozhodl tlačit do zábradlí. V průběhu pokusu se jeden člověk co největší silou snažil tlačit do horního pevného madla v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Pevné madlo bylo z profilu **UPE 80** a ve výšce  $h = 1100\ mm$  nad patními plechy. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

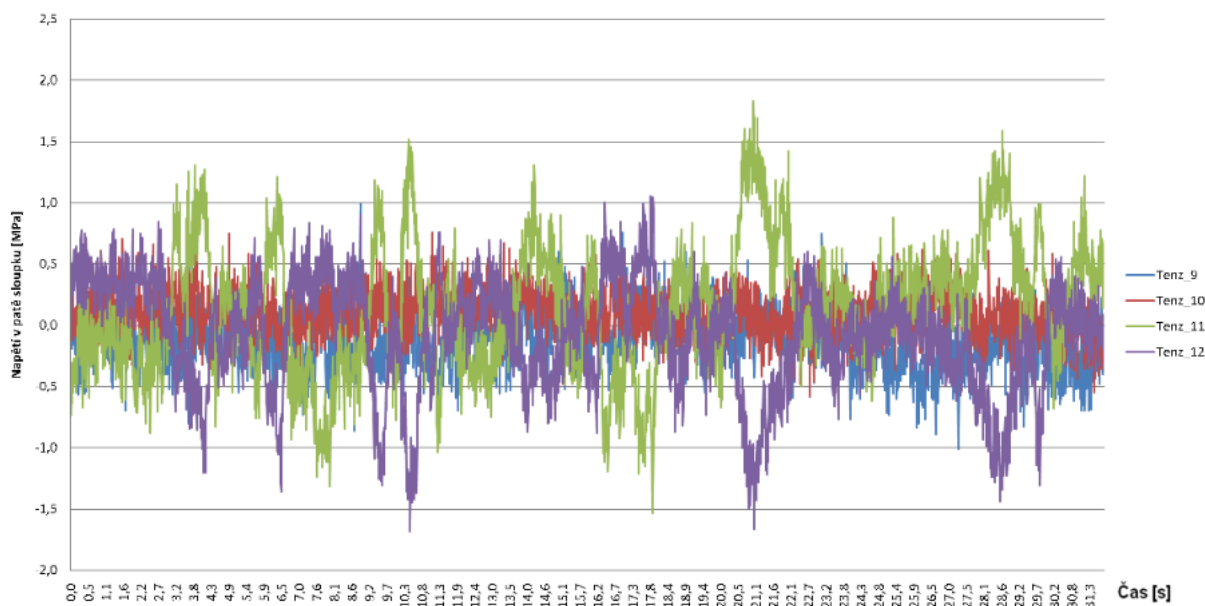
**Výsledky zatěžovacího stavu**

Obr. 91 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 12.ZS



Obr. 92 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 12.ZS





Obr. 93 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 12.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	19,411	<b>-35,140</b>
	Tenz_2	<b>34,917</b>	-19,806
	Tenz_3	3,794	-3,839
	Tenz_4	3,482	-3,784
2 IPE 80	Tenz_5	7,176	<b>-19,213</b>
	Tenz_6	4,931	<b>-20,688</b>
	Tenz_7	<b>19,243</b>	-3,489
	Tenz_8	<b>22,164</b>	-8,561
3 TR 76x5	Tenz_9	0,999	-1,010
	Tenz_10	0,760	-0,585
	Tenz_11	<b>1,833</b>	-1,536
	Tenz_12	1,056	<b>-1,678</b>

Obr. 94 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 12. ZS

Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 1, a to  $\sigma_{12ZS,max} = 34,92 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{12ZS,min} = -35,14 \text{ MPa}$ .

**Fotodokumentace**

Obr. 95 Průběh zkoušky 12.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Sloupky č. 1 a 2 byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Ostatní sloupky nebyly v rámci tohoto stavu příliš zatíženy. Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 35,14 = \mathbf{0,70\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 20,70 = \mathbf{0,38\ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 1 ve směru tlaku, tedy kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Síla vyvolaná tlakem člověka se dá odvodit jako:

$$F_{Ed,12ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{0,70 + 0,38}{1,17} = \mathbf{0,92\ kN},$$

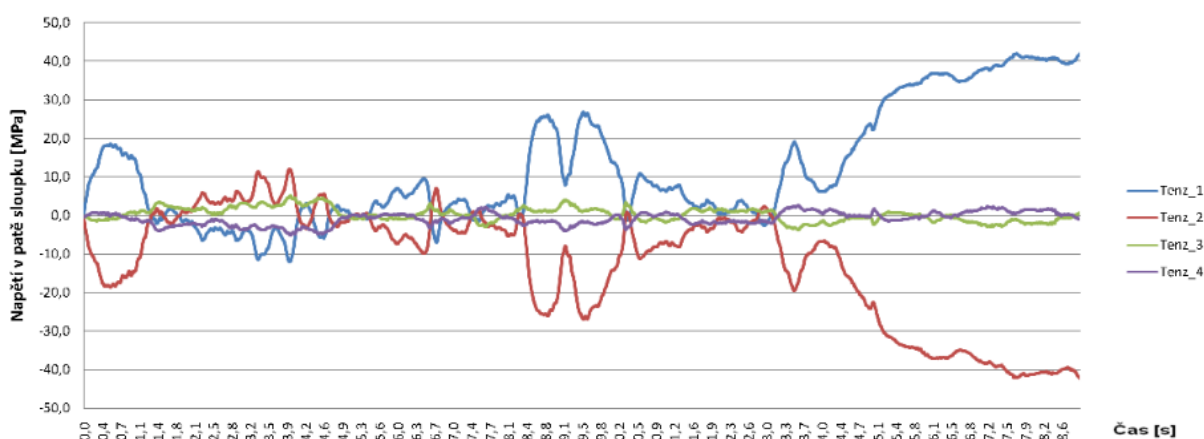
kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního pevného madla od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

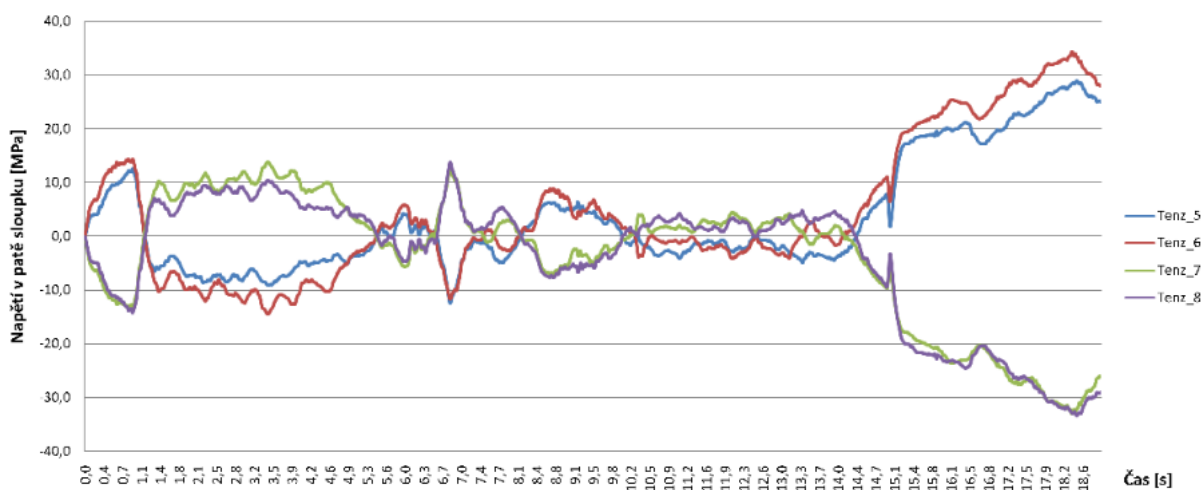
## 2.6.2.13. ZS13\_PM\_3osoba\_tlaceni

**Popis zatěžovacího stavu**

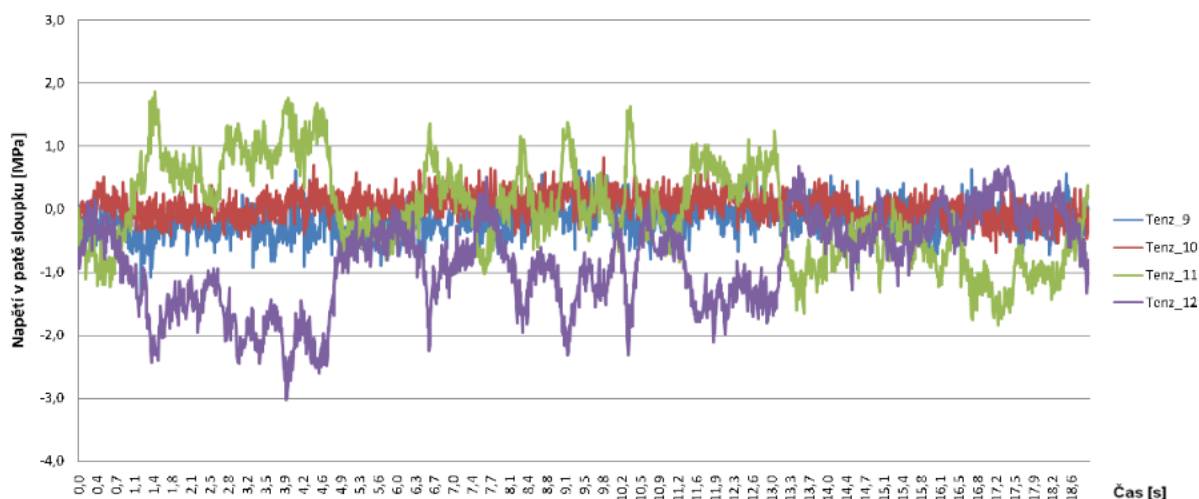
Třináctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od více lidí, kteří by se z nějakého důvodu rozhodli tlačit do zábradlí. Zároveň je tento stav simulací panického chování skupiny lidí, kteří by byli donuceni na zábradlí tlačit. V průběhu pokusu se tři lidé co největší silou snažili tlačit do horního pevného madla v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Pevné madlo bylo z profilu **UPE 80** a ve výšce  $h = 1100 \text{ mm}$  nad patními plechy. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

Obr. 96 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 13.ZS



Obr. 97 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 13.ZS



Obr. 98 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 13.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	<b>42,162</b>	-12,070
	Tenz_2	12,136	<b>-42,323</b>
	Tenz_3	5,135	-3,644
	Tenz_4	2,579	-5,196
2 IPE 80	Tenz_5	29,006	-12,494
	Tenz_6	<b>34,322</b>	-14,398
	Tenz_7	13,894	-32,910
	Tenz_8	13,931	<b>-33,400</b>
3 TR 76x5	Tenz_9	0,704	-1,279
	Tenz_10	0,823	-0,682
	Tenz_11	<b>1,866</b>	-1,843
	Tenz_12	0,683	<b>-3,021</b>

Obr. 99 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 13. ZS

Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 1, a to  $\sigma_{13ZS,max} = 42,16 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{13ZS,min} = -42,32 \text{ MPa}$ .

**Fotodokumentace**

Obr. 100 Průběh zkoušky 13.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Sloupky č. 1 a 2 byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici. Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 42,32 = \mathbf{0,85\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 33,16 = \mathbf{0,62\ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 1 ve směru tlaku, tedy kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Síla vyvolaná tlakem lidí se dá odvodit jako:

$$F_{Ed,13ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{0,85 + 0,62}{1,17} = \mathbf{1,26\ kN} = \mathbf{0,63\ kN/bm},$$

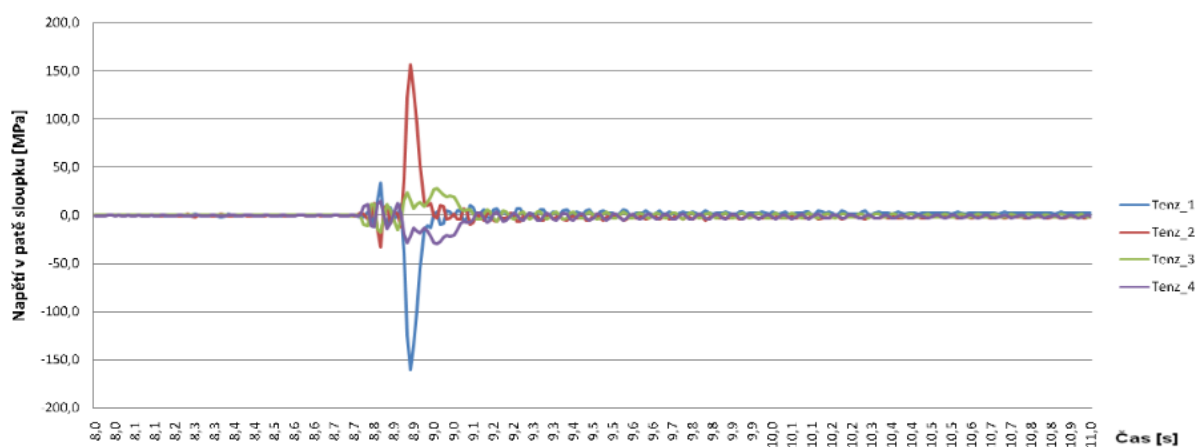
kde  $h = 1,17\ m$  je vzdálenost horního pevného madla od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

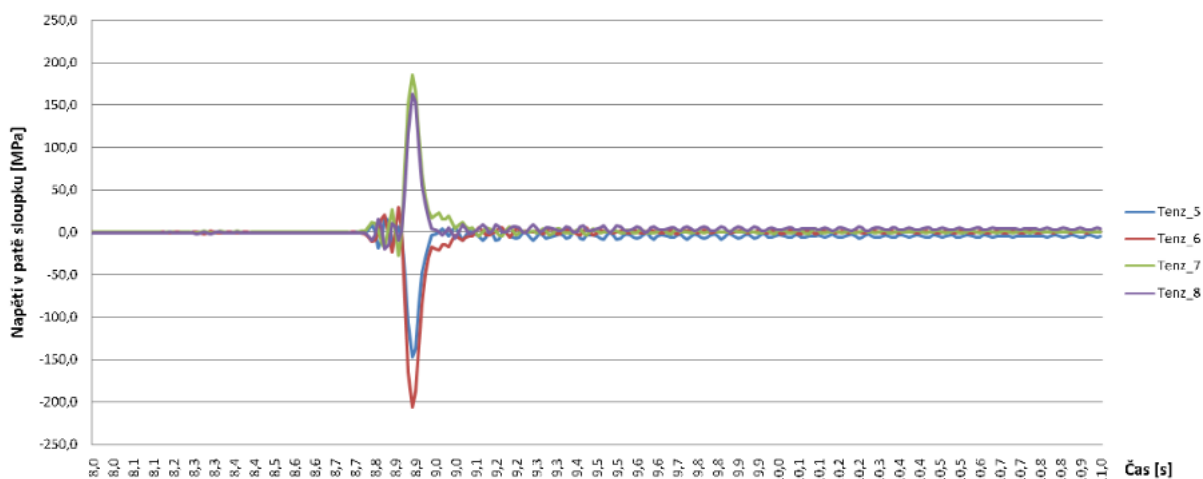
## 2.6.2.14. ZS14\_PM\_fig\_1,5m

**Popis zatěžovacího stavu**

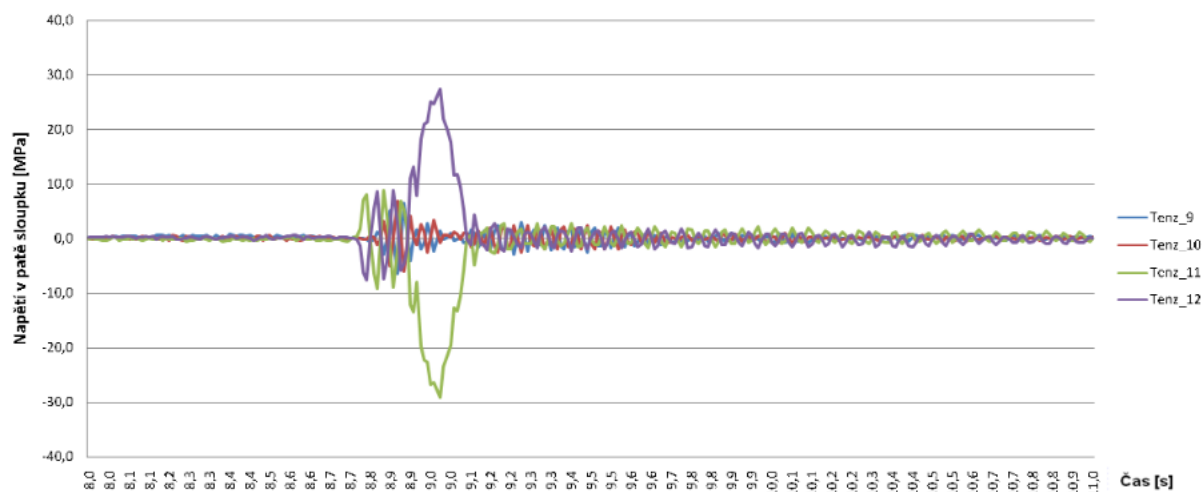
Čtrnáctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **1,5 m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **21 km/h**, narazila figurína do horního pevného madla v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Pevné madlo bylo z profilu **UPE 80** a ve výšce  **$h = 1100 \text{ mm}$**  nad patními plechy. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

Obr. 101 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 14.ZS



Obr. 102 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 14.ZS



Obr. 103 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 14.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	33,581	<b>-160,295</b>
	Tenz_2	<b>156,816</b>	-32,773
	Tenz_3	28,204	-17,790
	Tenz_4	14,927	-29,018
2 IPE 80	Tenz_5	18,407	-146,488
	Tenz_6	29,335	<b>-206,180</b>
	Tenz_7	<b>186,464</b>	-27,639
3 TR 76x5	Tenz_8	162,972	-19,038
	Tenz_9	6,490	-6,449
	Tenz_10	6,887	-5,965
	Tenz_11	8,794	<b>-29,220</b>
	Tenz_12	<b>27,383</b>	-7,670

Obr. 104 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 14. ZS

Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 2, a to  $\sigma_{14ZS,max} = 186,46 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{14ZS,min} = -206,18 \text{ MPa}$ .

**Fotodokumentace**

Obr. 105 Průběh zkoušky 14.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu.

Sloupky č. 1 a 2 byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici. Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 160,30 = 3,21 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 176,33 = 3,28 \text{ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 2 ve směru nárazu, tedy kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Velikost nárazové síly od figuríny se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,14ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{3,21 + 3,28}{1,17} = 5,55 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,17 \text{ m}$  je vzdálenost horního pevného madla od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

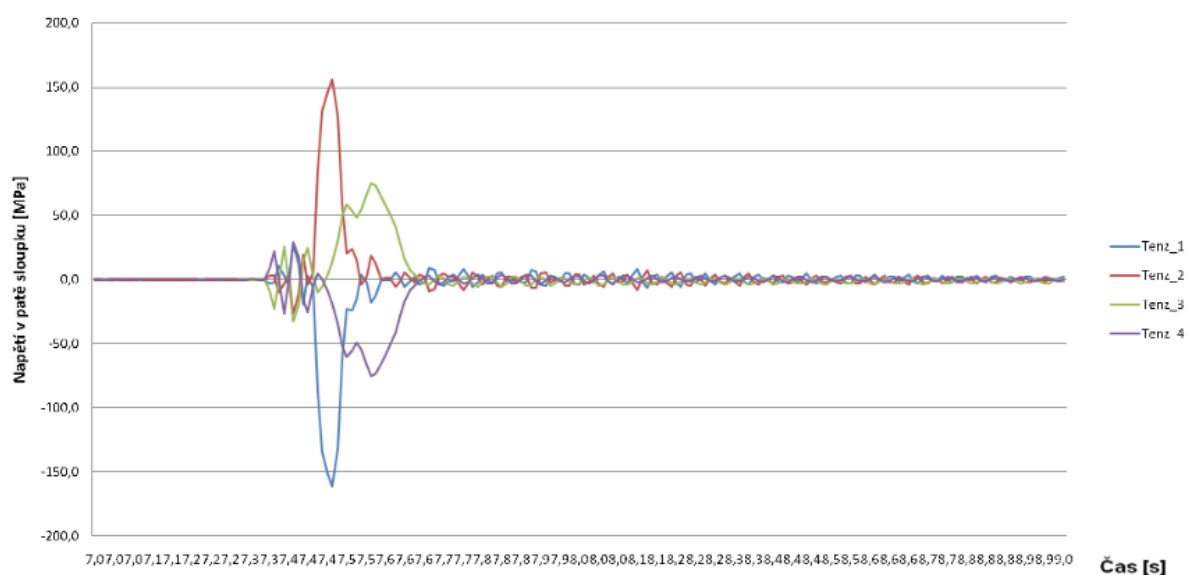
V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.



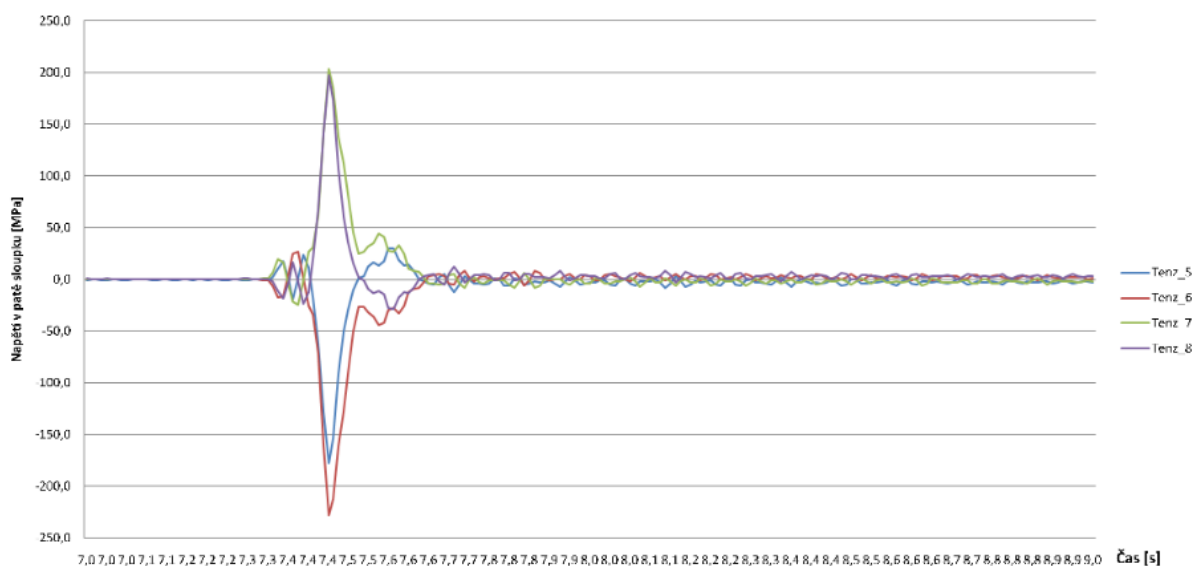
## 2.6.2.15. ZS15\_PM\_fig\_2m

**Popis zatěžovacího stavu**

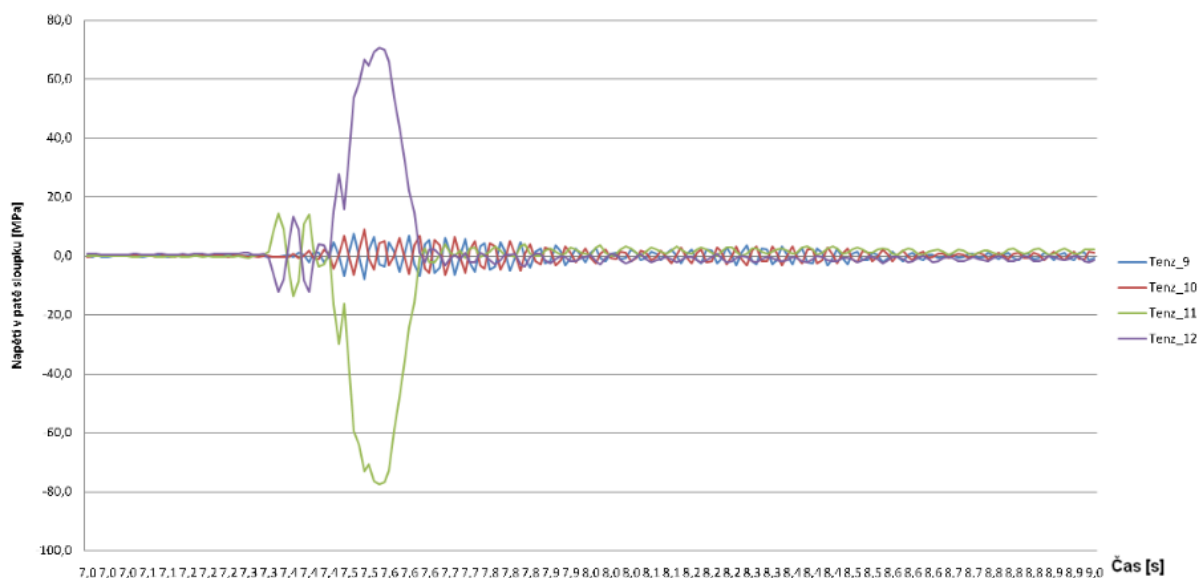
Patnáctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **2,0 m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **29 km/h**, narazila figurína do horního pevného madla v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Pevné madlo bylo z profilu **UPE 80** a ve výšce  **$h = 1100 \text{ mm}$**  nad patními plechy. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

Obr. 106 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 15.ZS



Obr. 107 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 15.ZS



Obr. 108 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 15.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	27,276	<b>-161,047</b>
	Tenz_2	<b>155,880</b>	-26,131
	Tenz_3	74,915	-32,511
	Tenz_4	28,884	-74,635
2 IPE 80	Tenz_5	30,426	-177,645
	Tenz_6	27,284	<b>-227,364</b>
	Tenz_7	<b>203,768</b>	-24,719
	Tenz_8	196,992	-29,005
3 TR 76x5	Tenz_9	7,595	-7,838
	Tenz_10	9,089	-6,426
	Tenz_11	14,276	<b>-77,434</b>
	Tenz_12	<b>70,698</b>	-12,322

Obr. 109 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 15. ZS

Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 2, a to  $\sigma_{15ZS,max} = 203,77 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{15ZS,min} = -227,36 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se sundalo pevné madlo a nainstalovalo se opět ocelové lanko, zavedlo se předepnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace***Obr. 110 Průběh zkoušky 15.ZS**Obr. 111 Průběh zkoušky 15.ZS***Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu, přestože u prostředního sloupku č. 2 se mu velice přiblížilo.

Sloupky č. 1 a 2 byly během experimentu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve směru  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 161,05 = 3,22 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 202,50 = 3,76 \text{ kNm}$

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 2 ve směru nárazu, tedy kolmo na zábradlí. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Velikost nárazové síly od figuríny se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,15ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{3,22 + 3,76}{1,17} = 5,97 \text{ kN},$$

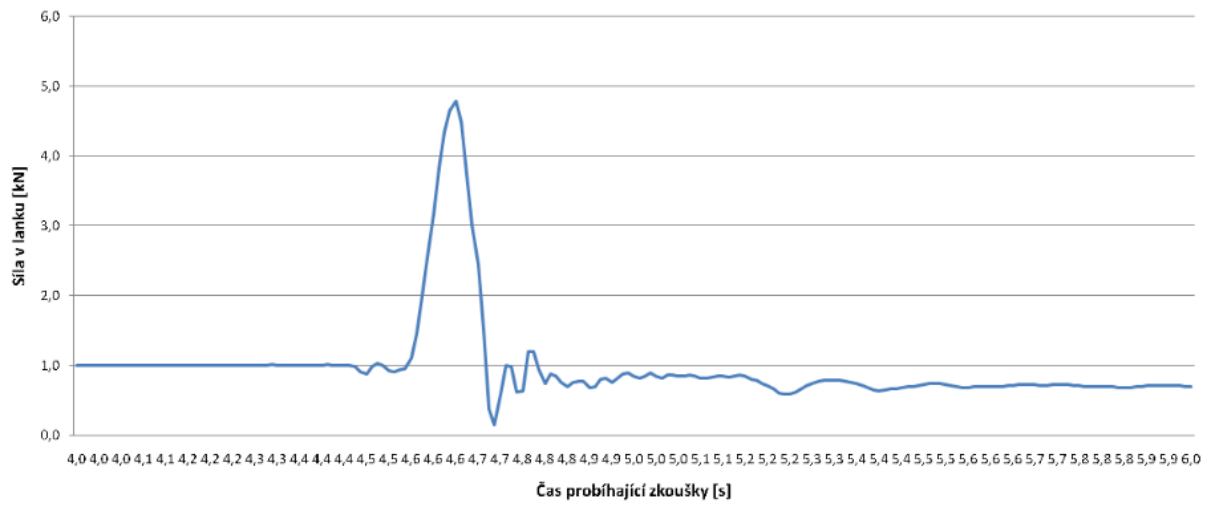
kde  $h = 1,17 \text{ m}$  je vzdálenost horního pevného madla od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

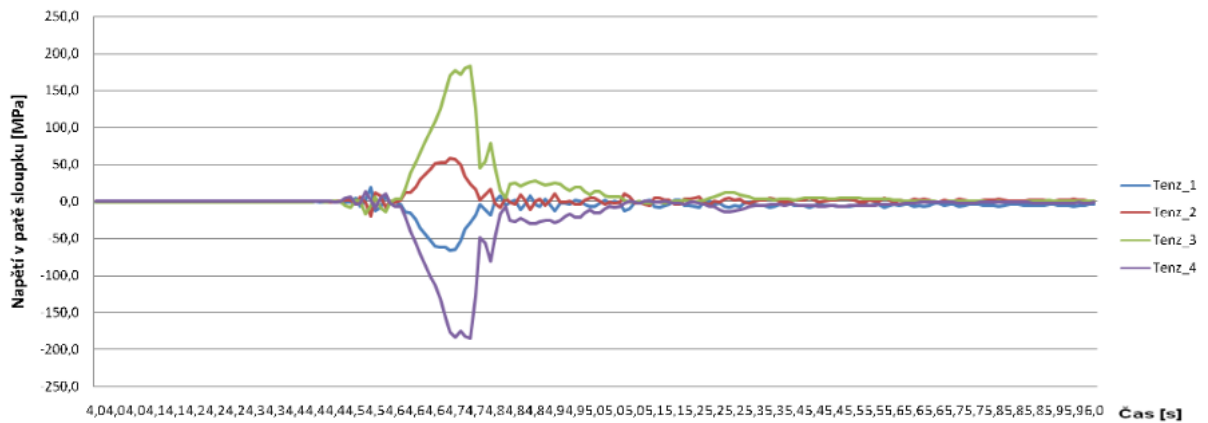
#### 2.6.2.16. ZS16\_13\_fig\_1,5m

##### Popis zatěžovacího stavu

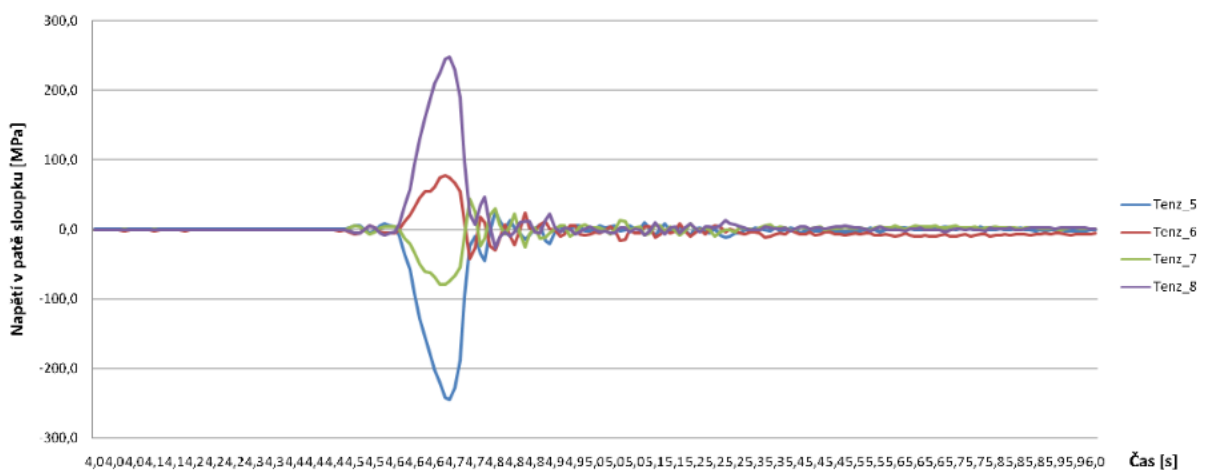
Šestnáctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **1,5m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **23 km/h**, narazila figurína do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1300 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předeprnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

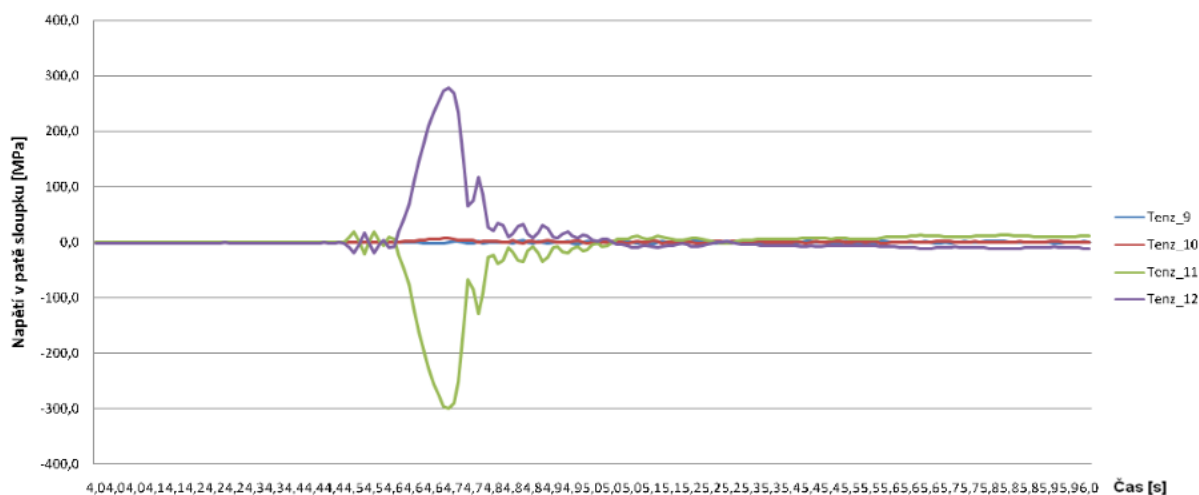
Obr. 112 Graf průběhu osové síly v lanku během 16.ZS



Obr. 113 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 16.ZS



Obr. 114 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 16.ZS



Obr. 115 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 16.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	19,514	-66,521
	Tenz_2	59,122	-20,225
	Tenz_3	<b>183,860</b>	-16,620
	Tenz_4	13,455	<b>-184,761</b>
2 IPE 80	Tenz_5	24,950	<b>-244,921</b>
	Tenz_6	77,355	-41,920
	Tenz_7	43,946	-78,294
	Tenz_8	<b>248,057</b>	-26,365
3 TR 76x5	Tenz_9	3,470	-3,181
	Tenz_10	7,470	-2,629
	Tenz_11	19,950	<b>-298,966</b>
	Tenz_12	<b>277,997</b>	-18,226

Obr. 116 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 16. ZS

Během nárazu bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{16ZS,max} = 4,79 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{16ZS,fin} = 0,70 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{16ZS,max} = 278,00 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{16ZS,min} = -298,97 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předepnutí a provedlo se nulové měření.

**Fotodokumentace**

Obr. 117 Průběh zkoušky 16.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že během nárazu se sloupek č. 1 choval čistě elasticky, zatímco u sloupků č. 2 a 3 byla na moment překročena hodnota meze kluzu. U sloupku č. 3 ve větší míře. Ocel krátce plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí, resp. zbytková deformace. Ovšem v rámci tohoto zatěžovacího stavu měly tyto veličiny malé hodnoty.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 66,52 = \mathbf{1,33\ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 184,76 = \mathbf{3,70\ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 146,01 = \mathbf{2,71\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 7,47 = \mathbf{0,17\ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 298,97 = \mathbf{6,94\ kNm}$ .

Maximální hodnota napětí, která se může v této oceli objevit, je hodnota meze kluzu. Po jejím dosažení už reálné napětí neroste a deformace se zvyšuje nelineárně bez závislosti na napětí. Je nutné dodat, že hodnoty ohybových momentů napsané výše, kdy je mez kluzu překročena,

nejsou skutečné hodnoty momentů, které se ve sloupcích vyskytují. Reálné hodnoty jsou tedy hodnoty plastických únosností sloupků, viz výše.

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu od nárazu zde překročila plastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se v tomto směru deformoval.

$$M_{Ed,z,3} = 6,94 \text{ kNm} > M_{Rd,pl}^{IPE} = W_{pl} \times f_y = 5,46 \text{ kNm}$$

Velikost nárazové síly od figuríny se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,16ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,33 + 2,71}{1,37} = 2,95 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,37 \text{ m}$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

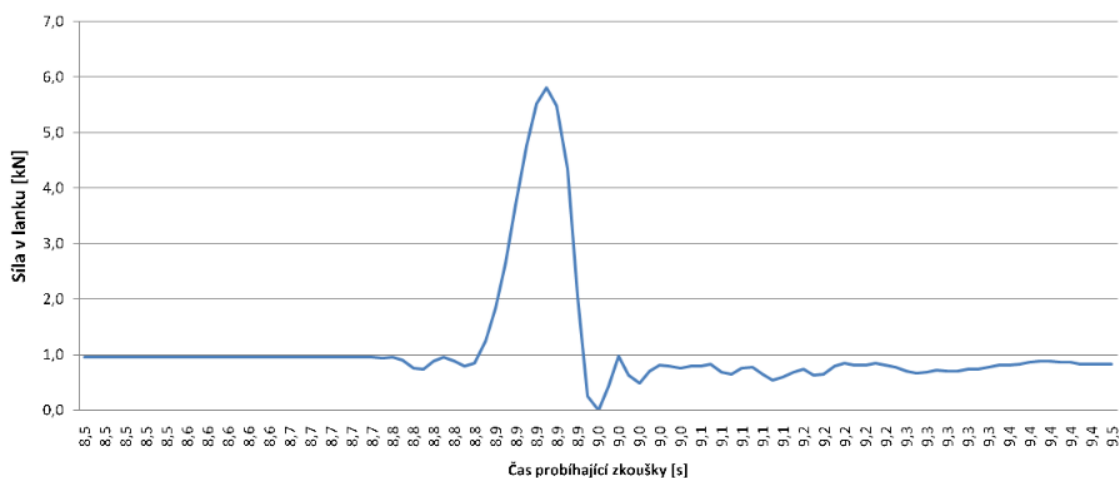
V tomto zatěžovacím stavu nevyhověl krajní sloupek č. 3, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.

#### 2.6.2.17. ZS17\_13\_fig\_2m

##### Popis zatěžovacího stavu

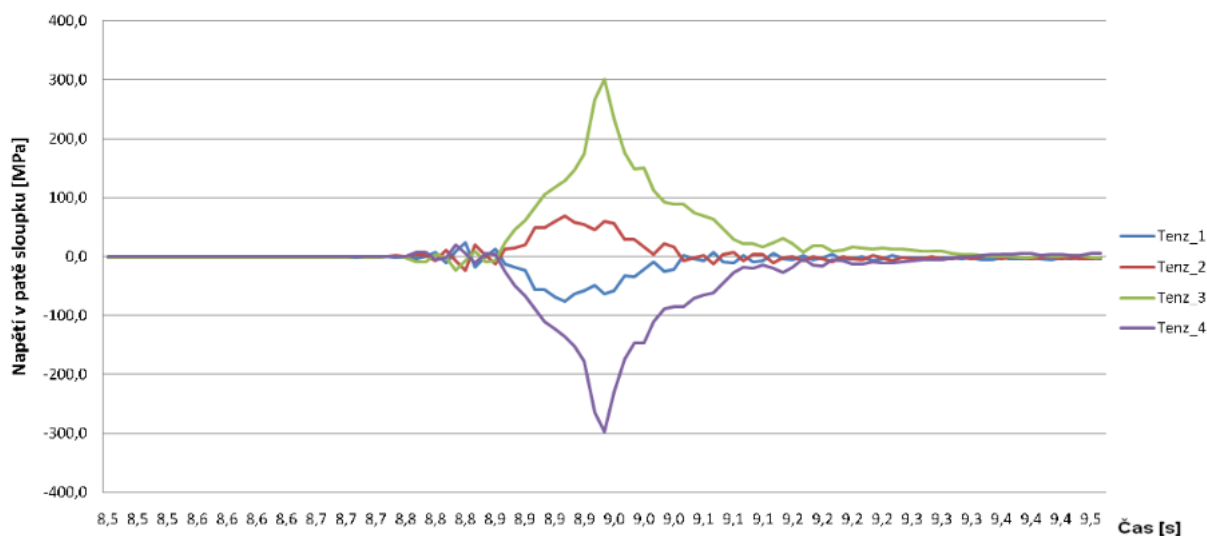
Sedmnáctý zatěžovací stav měl za účel vystavit zábradlí účinkům zatížení od pádu člověka, padajícího ze svahu o sklonu **1:1,25**. Po uměle vykonstruovaném svahu byla z výšky **2,0m** poslána mužská figurína hmotnosti **75 kg**, která svým proporcionálním rozložením váhy odpovídá dospělému člověku. V rychlosti, naměřené jako **28 km/h**, narazila figurína do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků 1 a 2. Sloupky byly z profilů **TR 76x5** a **IPE 80**. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1300 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem.

##### Výsledky zatěžovacího stavu

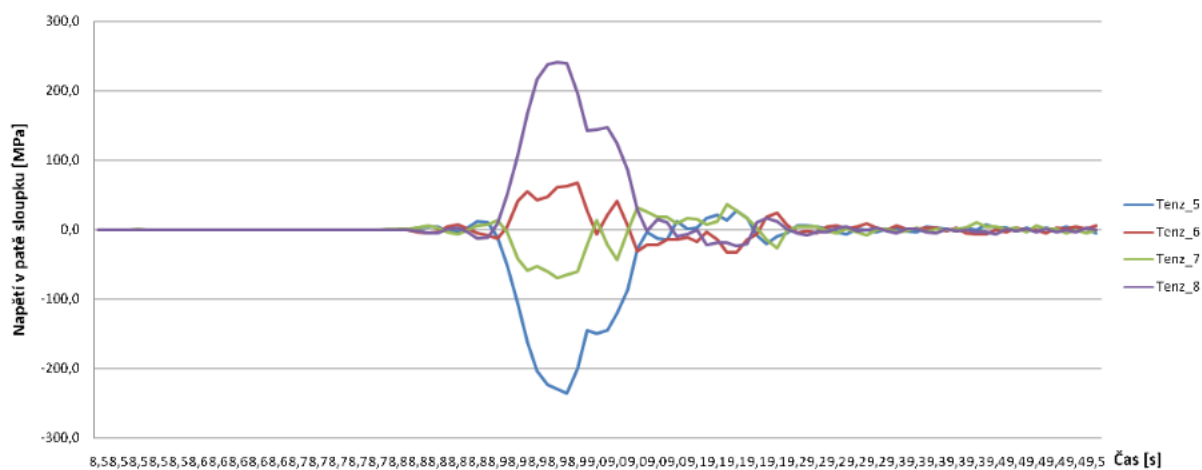


Obr. 118 Graf průběhu osově síly v lanku během 17.ZS

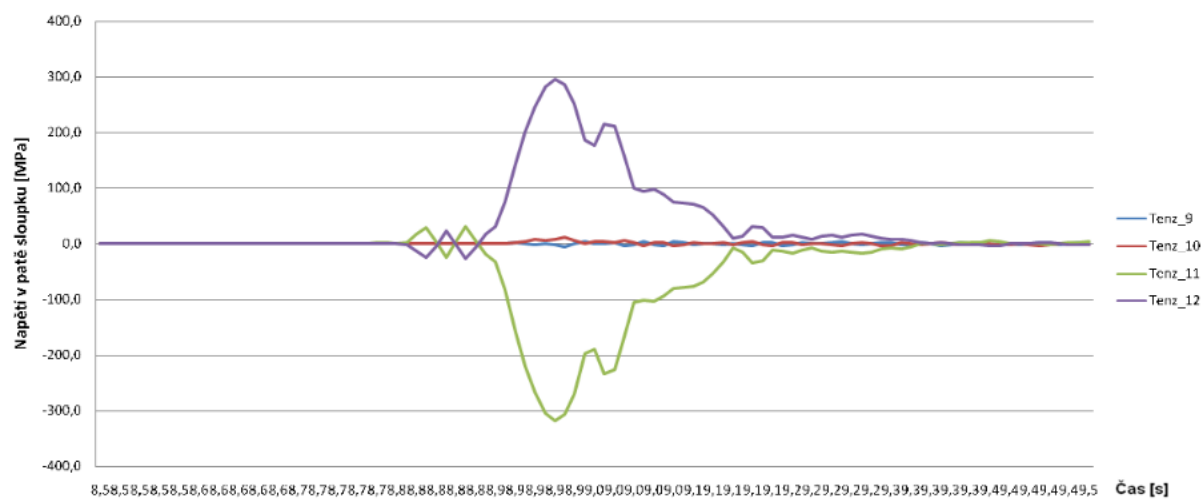




Obr. 119 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 17.ZS



Obr. 120 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 17.ZS



Obr. 121 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 17.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76 x5	Tenz_1	24,643	-75,479
	Tenz_2	68,677	-23,535
	Tenz_3	<b>302,087</b>	-22,908
	Tenz_4	20,538	<b>-296,654</b>
2 IPE 80	Tenz_5	27,552	<b>-235,230</b>
	Tenz_6	66,839	-32,835
	Tenz_7	36,354	-69,928
	Tenz_8	<b>241,357</b>	-22,924
3 TR 76 x5	Tenz_9	3,725	-5,573
	Tenz_10	11,389	-4,087
	Tenz_11	30,580	<b>-318,869</b>
	Tenz_12	<b>295,858</b>	-26,866

Obr. 122 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 17. ZS

Během nárazu bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{17ZS,max} = 5,82 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{17ZS,fin} = 0,85 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupku č. 3, a to  $\sigma_{17ZS,max} = 295,86 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{17ZS,min} = -318,87 \text{ MPa}$ . Před provedením dalšího zatěžovacího stavu se do lanka zavedla původní hodnota předeprnutí a provedlo se nulové měření.

### Fotodokumentace



Obr. 123 Průběh zkoušky 17.ZS

**Vyhodnocení výsledků**

Z grafů je vidět, že během nárazu byla u všech sloupků na moment překročena hodnota meze kluzu. Nejvíce u sloupku č. 3. Ocel krátce plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí, resp. zbytková deformace. Ovšem v rámci tohoto zatěžovacího stavu měly tyto veličiny malé hodnoty.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 75,48 = \mathbf{1,75\,kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 302,09 = \mathbf{7,01\,kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 138,86 = \mathbf{2,58\,kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 11,39 = \mathbf{0,26\,kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{pl} \times \sigma_{Rd} = 23\,220 \times 318,87 = \mathbf{7,40\,kNm}$ .

Maximální hodnota napětí, která se může v této oceli objevit, je hodnota meze kluzu. Po jejím dosažení už reálné napětí neroste a deformace se zvyšuje nelineárně bez závislosti na napětí. Je nutné dodat, že hodnoty ohybových momentů napsané výše, kdy je mez kluzu překročena, nejsou skutečné hodnoty momentů, které se ve sloupcích vyskytují. Reálné hodnoty jsou tedy hodnoty plastických únosností sloupků, viz výše.

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 1 a 3 ve směru rovnoběžném se zábradlím. Hodnota ohybového momentu od nárazu zde překročila plastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se v tomto směru deformoval.

$$M_{Ed,z,1} = 7,01\,kNm > M_{Rd,pl}^{IPE} = W_{pl} \times f_y = 5,46\,kNm$$

$$M_{Ed,z,3} = 7,40\,kNm > M_{Rd,pl}^{IPE} = W_{pl} \times f_y = 5,46\,kNm$$

Velikost nárazové síly od figuríny se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,17ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,75 + 2,58}{1,37} = \mathbf{3,16\,kN},$$

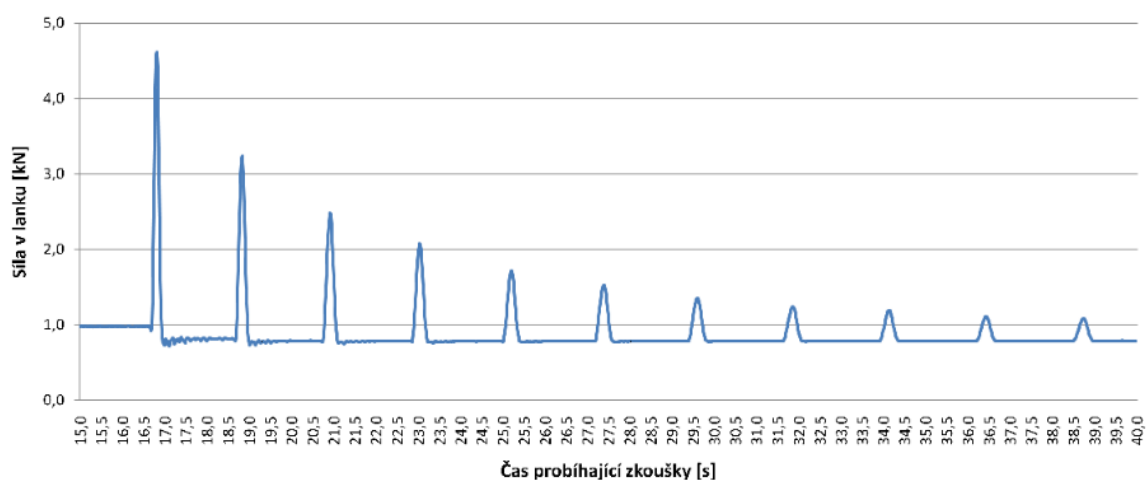
kde  $h = 1,37\,m$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu nevyhověl krajní sloupek č. 3 a č. 1, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.

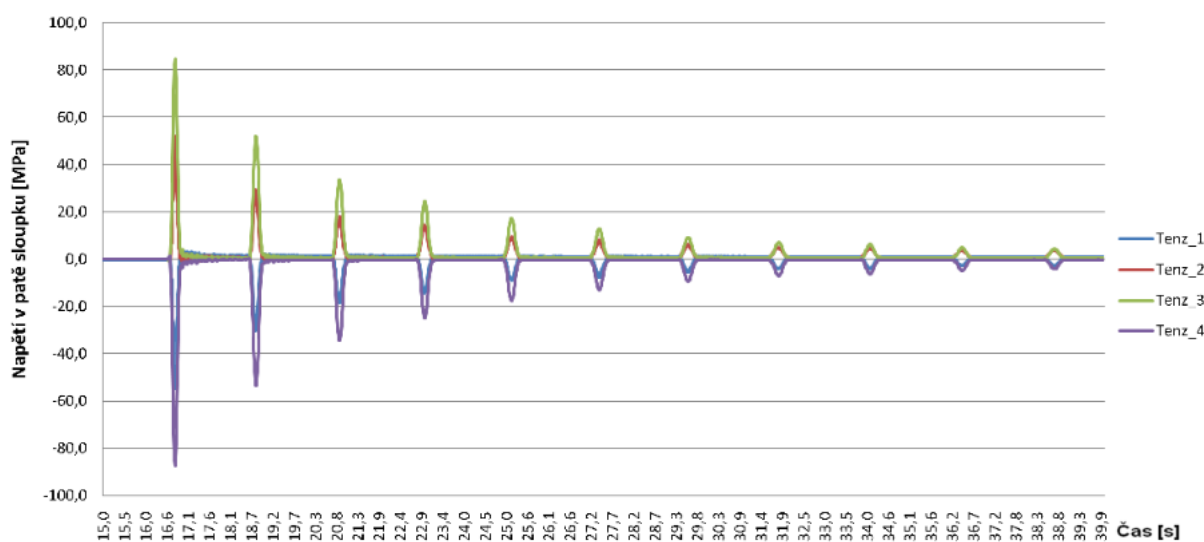
## 2.6.2.18. ZS18\_13\_pytel

**Popis zatěžovacího stavu**

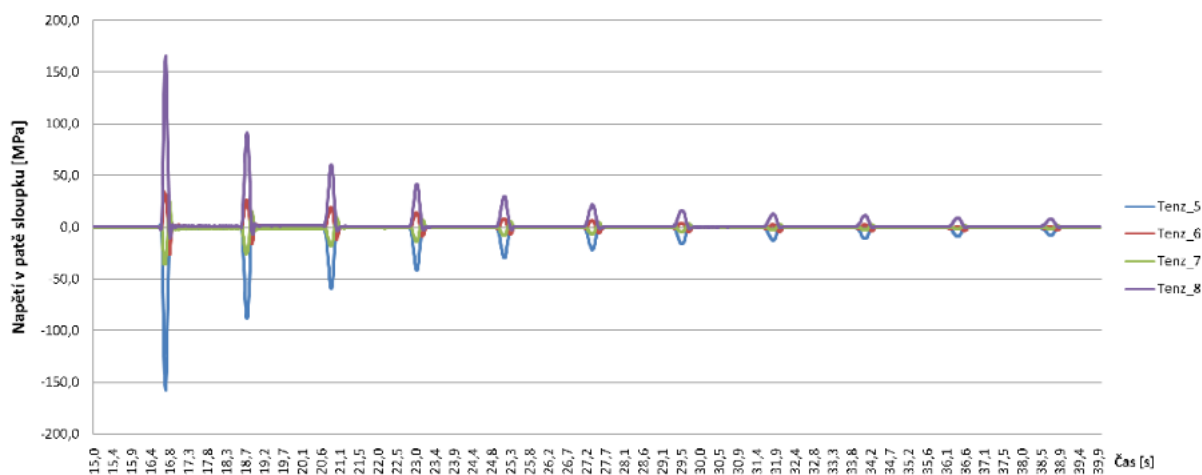
Osmnáctý zatěžovací stav vystavil zábradlí účinkům zatížení od nárazu zkušebním pytlek podle ČSN 74 3305. Pytel se zhouplnul do zábradlí z výšky 510 mm nad horním lankem do ocelových lanek o průměru  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  v místě os sloupků č. 1 a 2. Sloupky byly z profilů TR 76x5 a IPE 80. Horní lanko bylo ve výšce  $h = 1300 \text{ mm}$  nad patními plechy sloupků a v době nárazu bylo předepnuté na sílu  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Pomocí siloměru se měřila největší osová síla vzniklá v lanku nárazem. Pomocí tenzometrů se měřila napětí v patách všech sloupků.

**Výsledky zatěžovacího stavu**

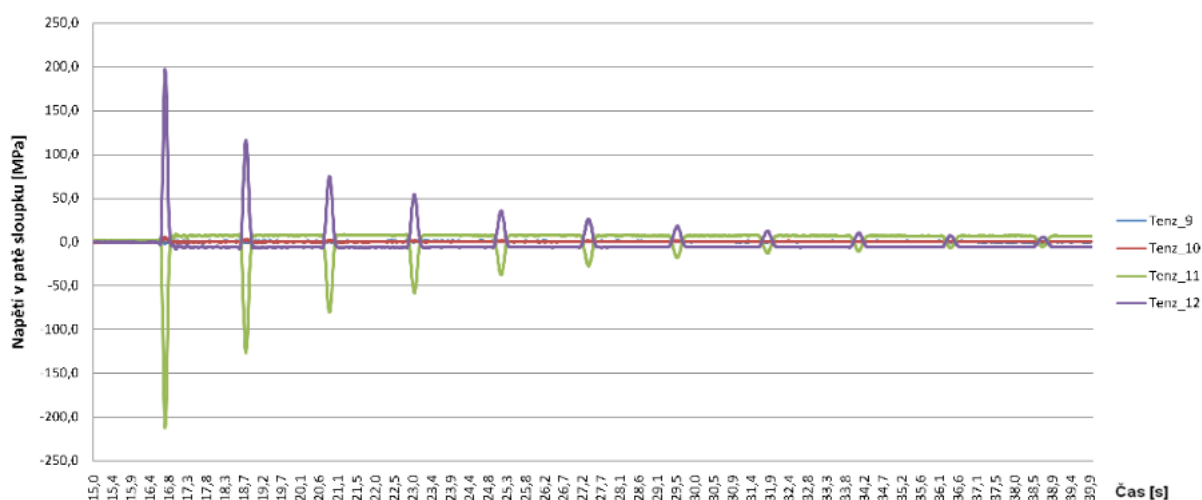
Obr. 124 Graf průběhu osové síly v lanku během 18.ZS



Obr. 125 Graf průběhu napětí v patě 1. sloupku během 18.ZS



Obr. 126 Graf průběhu napětí v patě 2. sloupku během 18.ZS



Obr. 127 Graf průběhu napětí v patě 3. sloupku během 18.ZS

Sloupek	Místo	Max. napětí [MPa]	Min. napětí [MPa]
1 TR 76x5	Tenz_1	3,394	-54,662
	Tenz_2	52,173	-1,388
	Tenz_3	<b>84,797</b>	-1,312
	Tenz_4	1,399	<b>-87,453</b>
2 IPE 80	Tenz_5	11,907	<b>-157,357</b>
	Tenz_6	34,670	-26,252
	Tenz_7	25,898	-35,472
	Tenz_8	<b>166,430</b>	-11,023
3 TR 76x5	Tenz_9	1,105	-1,961
	Tenz_10	4,584	-0,976
	Tenz_11	8,788	<b>-212,909</b>
	Tenz_12	<b>197,234</b>	-8,350

Obr. 128 Přehled extrémních hodnot naměřených napětí během 18. ZS

Během nárazu bylo v horním lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{18ZS,max} = 4,61 \text{ kN}$ . Napínákem předem vnesená tahová síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$  se po nárazu zmenšila na hodnotu  $F_{18ZS,fin} = 0,72 \text{ kN}$ . Extrémní hodnoty napětí byly naměřeny na sloupcu č. 3, a to  $\sigma_{18ZS,max} = 197,23 \text{ MPa}$  a  $\sigma_{18ZS,min} = -212,91 \text{ MPa}$ .

### Fotodokumentace



Obr. 129 Průběh zkoušky 18.ZS

### Vyhodnocení výsledků

Z grafů je vidět, že se během pokusu všechny sloupky chovaly čistě elasticky. Žádné z naměřených napětí nepřekročilo mez kluzu, přestože u sloupku č. 3 se mu přiblížilo.

Krajní sloupky byly během nárazu vystaveny extrémním ohybovým momentům ve dvou směrech  $M_y$  (směr kolmo na zábradlí) a  $M_z$  (směr rovnoběžně se zábradlím), zatímco střední sloupek pouze momentem  $M_y$  (lanka jím volně procházejí). Pro výpočet ohybového momentu u středního sloupku byla vzata zprůměrovaná hodnota napětí ve více zatížené pásnici.

Hodnoty momentů jsou:

- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 54,66 = 1,09 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 1 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,1} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 87,45 = 1,75 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 2 (IPE 80)  $M_{Ed,y,2} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 18\,585 \times 96,16 = 1,79 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,y,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 4,58 = 0,09 \text{ kNm}$
- Sloupek č. 3 (TR 76x5)  $M_{Ed,z,3} = W_{el} \times \sigma_{Rd} = 20\,000 \times 212,91 = 4,26 \text{ kNm}$ .

Nejvíce byl zatížen sloupek č. 3 ve směru rovnoběžným se zábradlím. Hodnota ohybového momentu ovšem nepřekročila elastickou únosnost sloupku v ohybu a sloupek se nedeformoval.

Velikost nárazové síly od pytle se dá odvodit způsobem:

$$F_{Ed,18ZS} = \frac{M_{Ed,y,1} + M_{Ed,y,2}}{h} = \frac{1,09 + 1,79}{1,37} = 2,10 \text{ kN},$$

kde  $h = 1,37 \text{ m}$  je vzdálenost horního lanka od místa, kde se napětí měřilo, tj. 100 mm nad patní deskou sloupku.

V tomto zatěžovacím stavu na ohybovou únosnost vyhověly všechny sloupky.

## 2.7. Závěrečné shrnutí

Hodnocení výsledků lze shrnout dle typů resp. kategorií zatěžovacích stavů:

Simulace pádu do zábradlí:

- Extrémních hodnot bylo dosaženo při **2 ZS**, tj. pádu ze svahu délky **2,0 m** do ocelových lanek v úrovni **1100 mm** nad patními plechy.
- Během nárazu byla v lanku dosažena tahová síla  $F_{2ZS,max} = 7,68 \text{ kN}$ .
- Ve sloupku č. 3 bylo dosaženo meze kluzu.
- Ocel výrazně plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí o hodnotě cca  $\sigma_{fin} = 600 \text{ MPa}$  a zbytkové přetvoření o hodnotě cca  $\varepsilon_{fin} = 3000 \mu\text{m/m}$ .
- Pád do zábradlí vyvolal působící sílu  $F_{Ed,2ZS} = 5,44 \text{ kN}$ .
- Nevyhověl krajní sloupek č. 3, kde ve směru  $M_z$  byl dosažen plastický moment únosnosti.

Sezení:

- Extrémních hodnot bylo dosaženo při **4. ZS**, tj. sezení tří lidí na horním ocelovém lanku.
- Maximální statická hodnota síly v lanku, kdy všichni sedící lidé bez pohybu pouze seděli na lanku, byla  $F_{4ZS,max,st} = 4,32 \text{ kN}$ .
- Maximální dynamická hodnota síly v lanku, kdy se lidé na lanku hýbali a pohupovali, byla  $F_{4ZS,max,dyn} = 4,41 \text{ kN}$ .
- Tři lidé o celkové váze **264,7 kg** vyvolali působící spojitou svislou sílu o hodnotě  $F_{Ed,4ZS} = 1,30 \text{ kN/bm}$ .

Tlačení:

- Extrémních hodnot bylo dosaženo při **6. ZS**, tj. tlačení tří lidí do horního ocelového lanka.
- Během zkoušky bylo v lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{6ZS,max} = 3,89 \text{ kN}$ .
- Síla vyvolaná tlakem tří lidí byla  $F_{Ed,6ZS} = 0,65 \text{ kN/bm}$ .

Vandalismus:

- Největší namáhání sloupků vyvolal **7. ZS**, tj. vandalismus v podobě mlácení tyčí do výplně zábradlí.
- Během zkoušky bylo v lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{7ZS,max} = 6,18 \text{ kN}$ .
- Ve sloupku č. 3 bylo dosaženo meze kluzu.

- Ocel krátce plasticky tekla, sloupky se deformovaly a zůstalo v nich zbytkové napětí, resp. zbytková deformace. Ovšem v rámci tohoto zatěžovacího stavu měly tyto veličiny malé hodnoty.
- Mlácení páčidlem vyvolalo maximální působící sílu  $F_{Ed,7ZS} = 2,87 \text{ kN}$ .

Nárazová zkouška s pytle:

- Extrémních hodnot bylo dosaženo při **10 ZS**, tj. nárazu pytle do ocelových lanek ve výškové úrovni **1100 mm** nad patními.
- Během zkoušky bylo v lanku dosaženo maximální tahové síly  $F_{10ZS,max} = 5,54 \text{ kN}$ .
- Maximální velikost nárazové síly od pytle byla  $F_{Ed,10ZS} = 2,23 \text{ kN}$ .



### 3. Teoretická část

Pro potřeby této práce bylo vytvořeno několik výpočetních modelů MKP, díky kterým se na dané zatížení (kap. 3.2) navrhovaly dimenze působících prutových prvků. Základní geometrie modelů zábradlí je shodná s geometrií zkušebního prvku tj, rozteč sloupků je **2000 mm** (kap. 2). Rozdíl oproti experimentu dělá mimo jiné výškové rozložení lanek a profily ocelových sloupků, které jsou zde voleny jako všechny trubkové, více v kapitole 3.1.5.

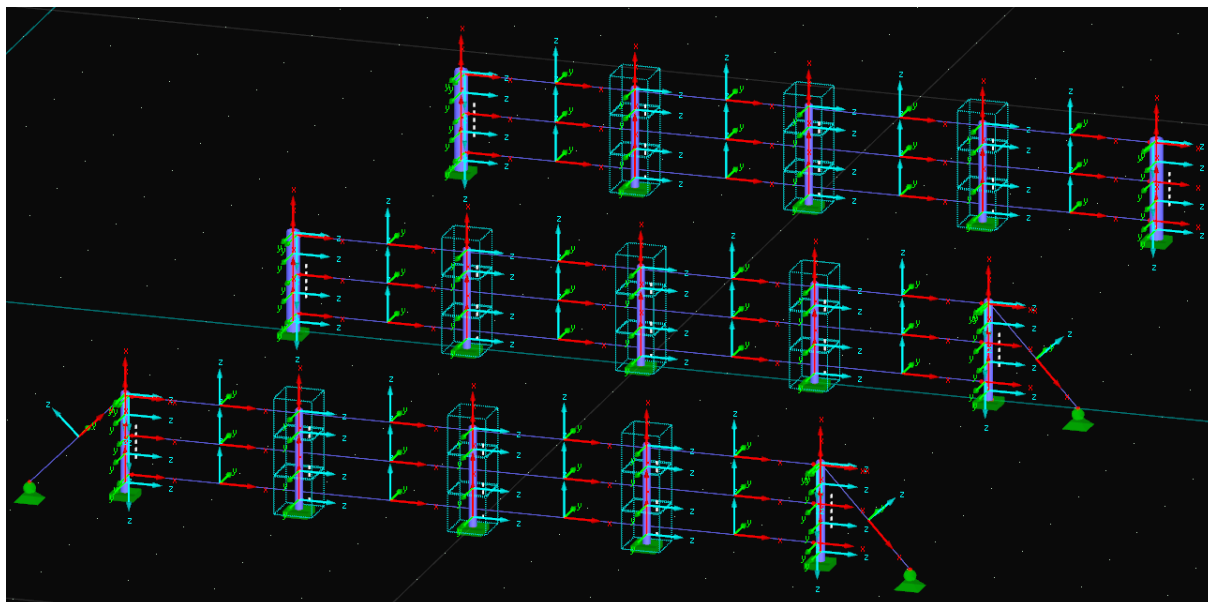
Návrhy dimenzí prvků byly provedeny pro různé celkové délky zábradlí, resp. různý počet dvoumetrových polí. Nejkratší model má **4 m**, tedy 2 pole, nejdelší model má **10 m**, tedy 5 polí. Dále v rámci zkoumání chování a namáhání prvků byly vytvořeny modely zábradlí v různých sklonech, konkrétně **vodorovné, 1:4, 1:2 a 1:1** (viz Obr. 2). Po návrhu dimenzí byly modelovány celé sestavy zábradlí, které mají za úkol již navržené dimenze sloupků otestovat ve velkém, případně je upravit.

#### 3.1. Výpočetní model

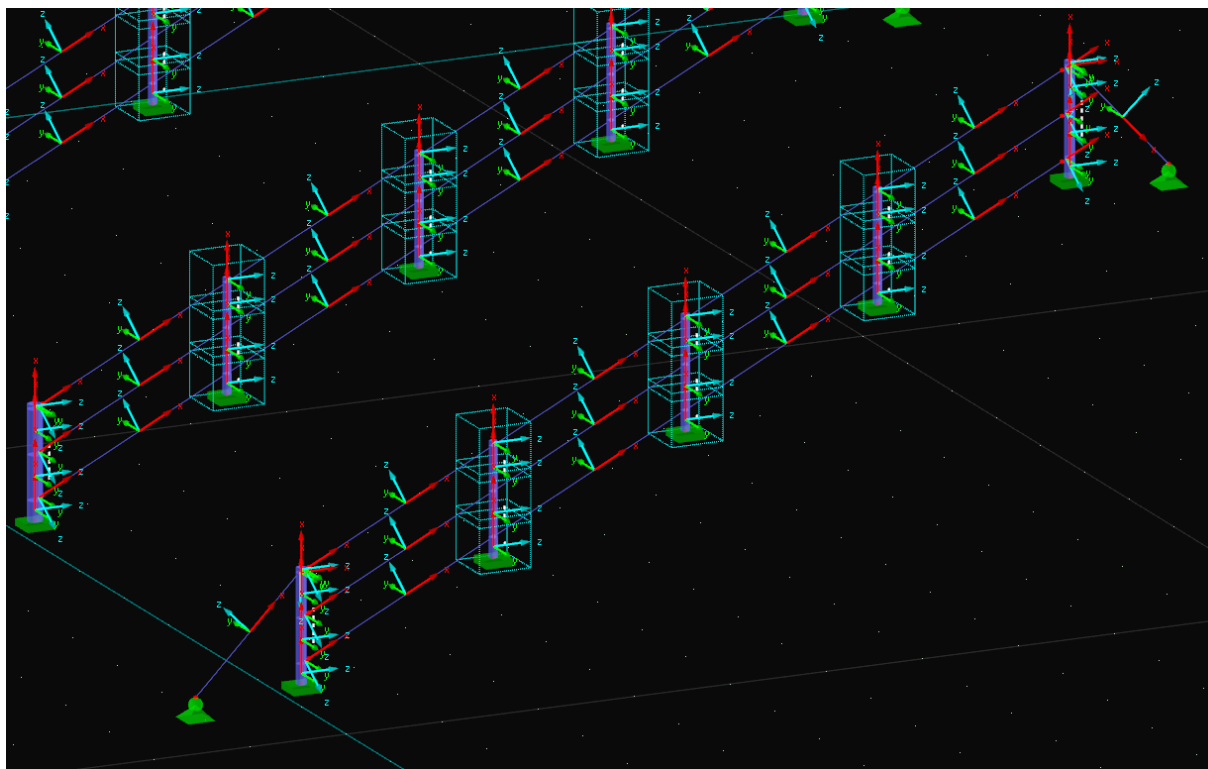
Při tvorbě výpočetních modelů je cílem použít takový způsob modelování, který s dostatečnou přesností vystihuje skutečné chování konstrukcí. V tomto případě byly vytvořeny modely, které jsou dostatečně výstižné a co možná nejjednodušší.

Modely byly vytvořeny v programu RFEM 5 DLUBAL jako prostorové s použitím prutových prvků, představující sloupky a lanka, viz [2]. Součástí modelů jsou také uzlová uvolnění a tuhé vazby neurčitého průřezu s okrajovými podmínkami vetknutí/kloub.

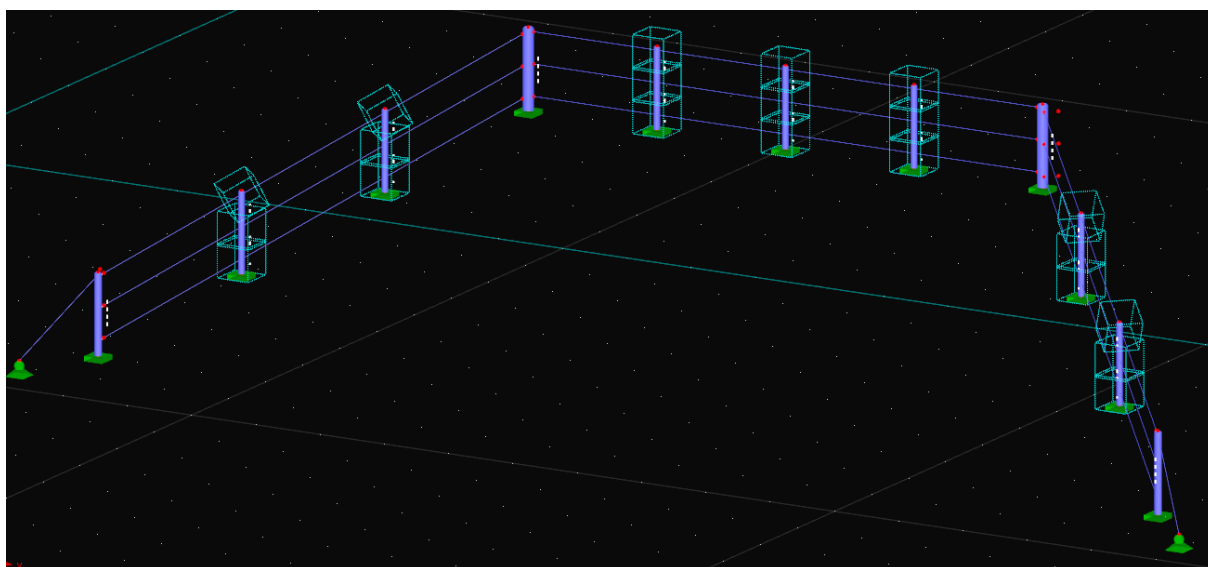
Příklady modelů zábradlí jsou ukázány na následujících obrázcích.



Obr. 130 Příklad modelu zábradlí – vodorovné 8,0 m



Obr. 131 Příklad modelu zábradlí – sklon 1:2, dl. 8,0 m

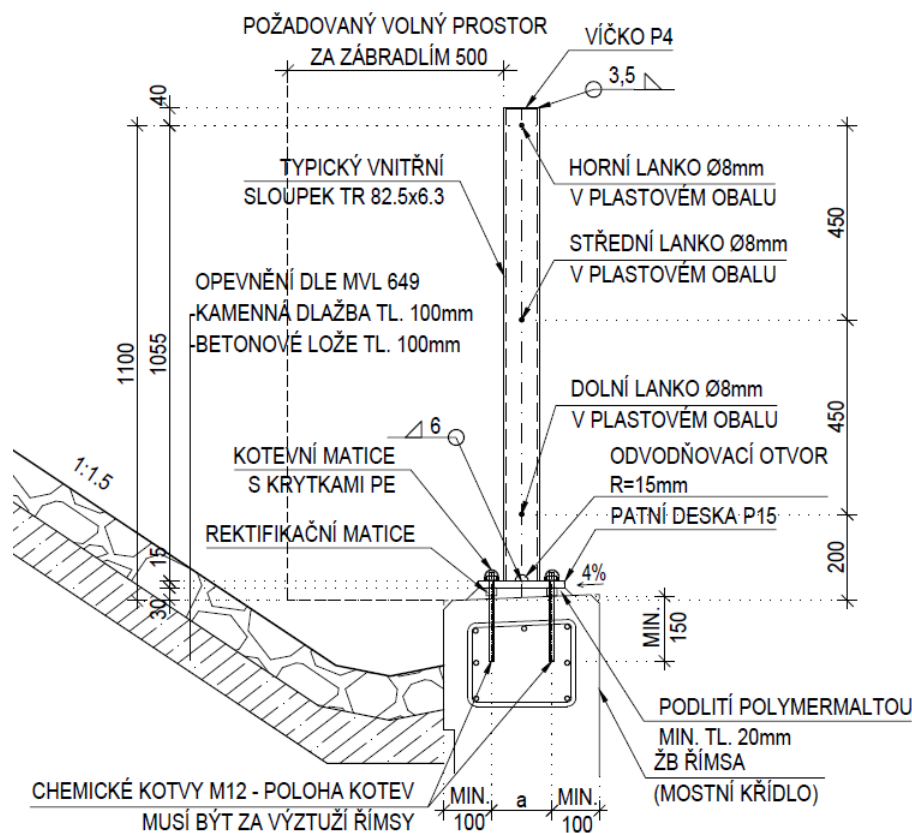


Obr. 132 Příklad modelu zábradlí – sestava 8,0 m vodorovně,  
6,0 m - sklon 1:2, úhel půdorysného lomu 45°

### 3.1.1. Sloupky zábradlí

Sloupky jsou ocelové, se zvolenou pevnostní třídou **S235JR** dle ČSN EN 1991-1-1:2006, která má hodnotu mezi kluzu  $f_y = 235 \text{ MPa}$  a mezi pevnosti  $f_u = 360 \text{ MPa}$ . Sloupky se chovají dle izotropního lineárně elastického materiálového modelu. Součinitel spolehlivosti materiálu je volen tak, aby finální návrh měl rezervu v únosnosti a byl tudíž na straně bezpečnosti. Součinitel spolehlivosti oceli je zvolen  $\gamma_M = 1,10$ . Celková výška sloupků je **1150 mm** a vychází z potřeby mít nejvyšší lanko v poloze **1100 mm** nad úroveň hrany římsy

(Obr. 133) dle ČSN 74 3305. Profily sloupků jsou hlavním předmětem těchto modelů a budou se lišit v závislosti na počtu polí zábradlí.



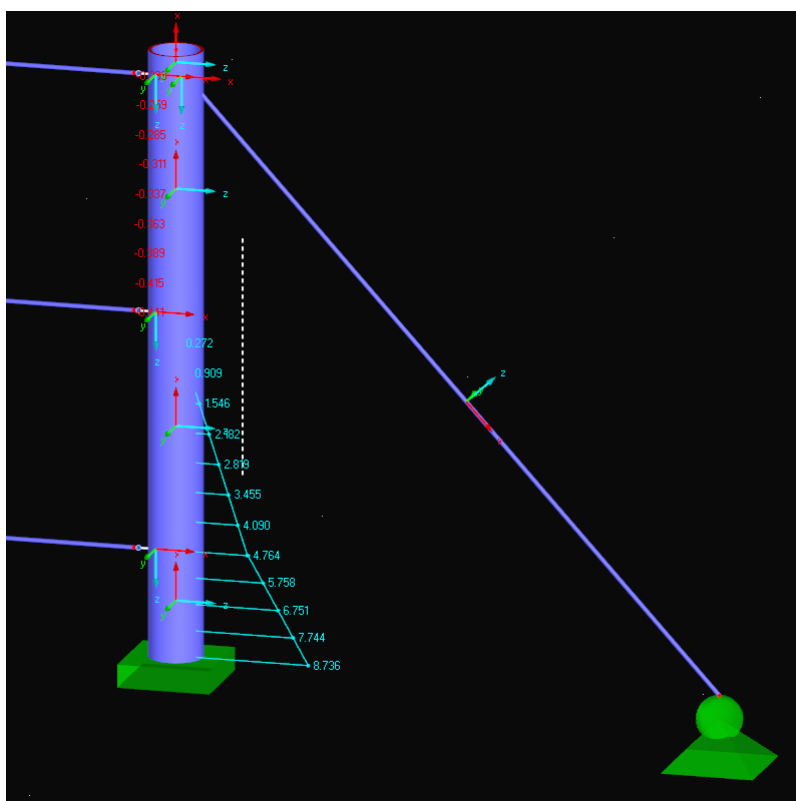
Obr. 133 Lankové zábradlí – příčný řez

V modelech figurují sloupky trojího typu. Prvním typem jsou tzv. normální sloupky, tj. středové sloupky neumístěné ani na kraji zábradelní sestavy, ani v místě půdorysné změny směru lanek. Je předpokládáno, že tyto typy sloupků budou nejméně zatížené v tom smyslu, že na rozdíl od krajních typů sloupků, se zde téměř nemá nevyskytovat namáhání ohybovým momentem v rovině zábradlí. Objevuje se zde namáhání kolmo na rovinu zábradlí, které vzniká buď přenosem sil z lanek do sloupků, nebo přímým nárazem osoby do sloupku.

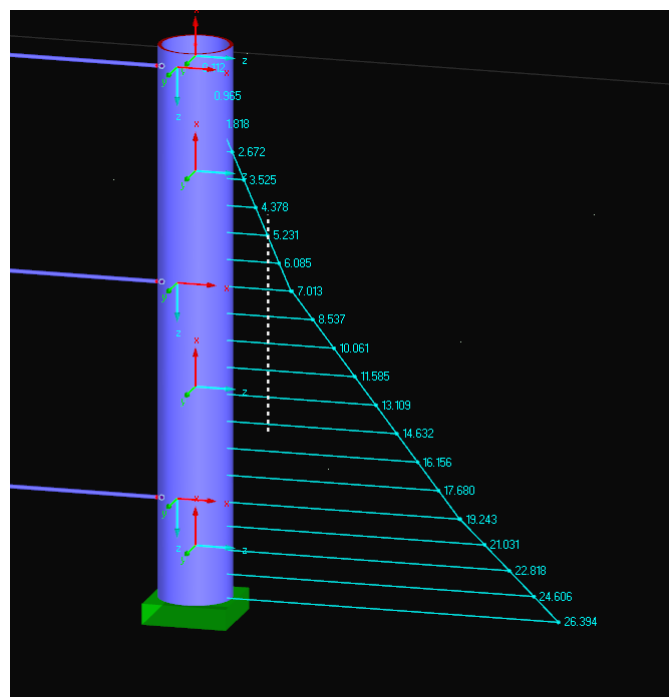
Dalším typem sloupků jsou sloupky krajní, a to buď kotvené lankem k zemi, nebo volné; nekotvené. Logickým předpokladem je, že namáhání nekotvených sloupků bude výrazněji větší než těch kotvených, tudíž i jejich navržené dimenze budou mohutnější. Dominantním namáháním těchto sloupků je ohybový moment, resp. napětí v rovině zábradlí.

Třetím typem sloupků jsou sloupky v místech půdorysné změny směru lanek. Takové se vyskytují pouze u sestav, kde se kombinují části zábradlí o různých počtech polí, různých sklonech a rozdílných půdorysných úhlech zešikmých částí zábradlí. Namáhání těchto sloupků se může lišit právě dle posledního zmíněného v předchozí větě, kdy takový sloupek může být zatížen momentem v rovině zábradlí i mimo ni.

V programu RFEM 5 byly sloupky modelovány jako svislé pruty typu Nosník. Všechny typy sloupků, včetně porovnání jejich namáhání od stejného zatížení (kap. 3.2.3) jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

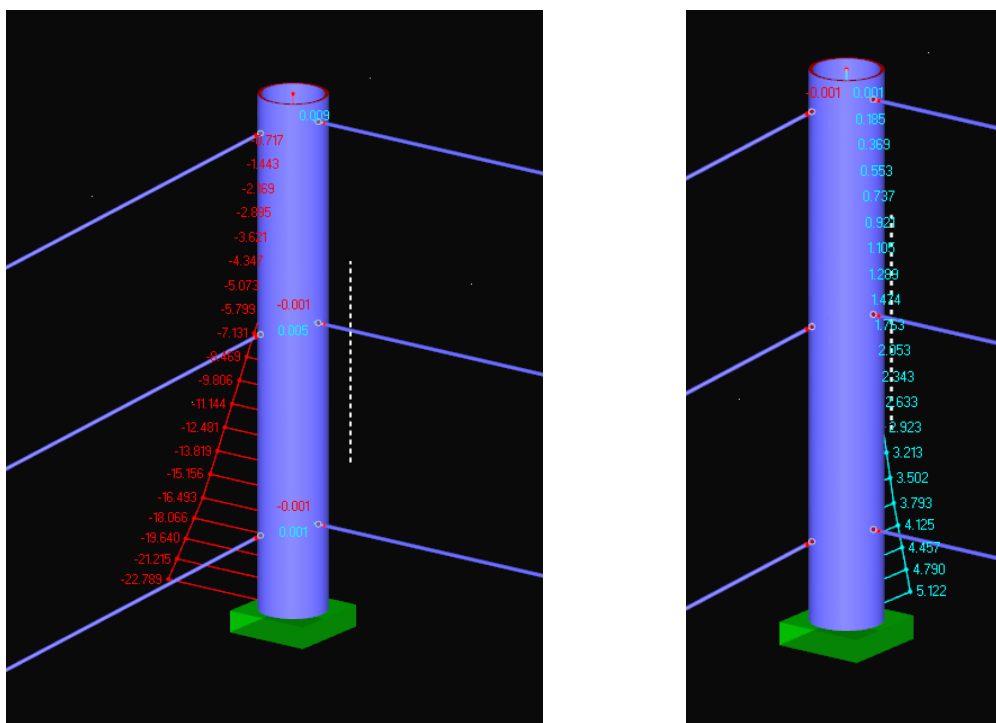


Obr. 134 Ohybový moment na kotveném sloupku od zatížení A



Obr. 136 Ohybový moment na nekotveném sloupku od zatížení A

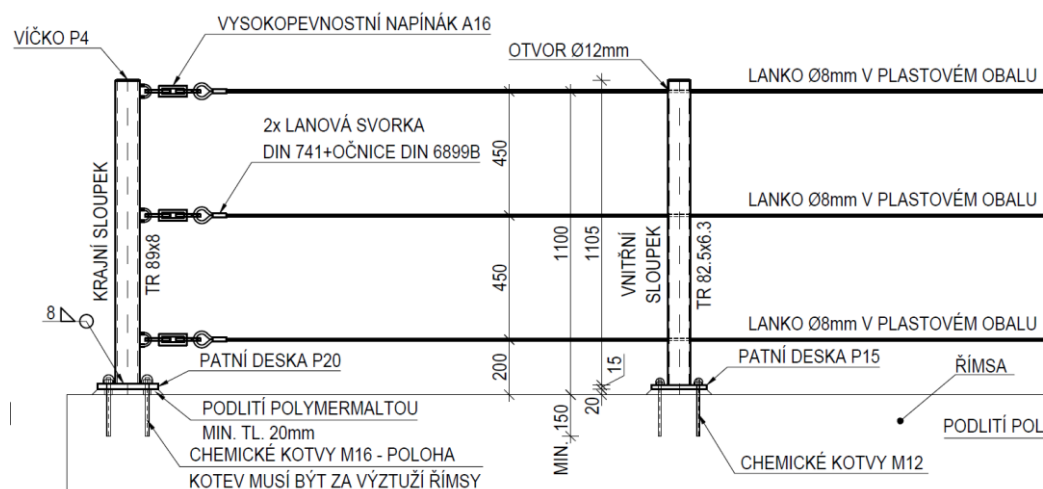
Obr. 135 Ohybový moment na „společný“ sloupek v rovině horní části zábradlí od zatížení A



Obr. 137 Ohybový moment na „společný“ sloupek v rovinu „společný“ sloupek mimo rovinu zábradlí od zatížení A  
Obr. 138 Ohybový moment na horní části zábradlí od zatížení A

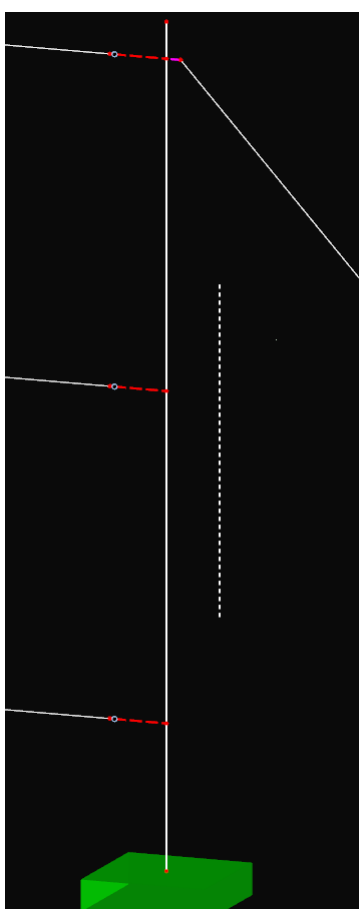
### 3.1.2. Ocelová lanka

Na lankových zábradlích jsou, pokud není třeba jinak, použita ocelová lanka o průměru **8 mm**, krytá ve světlém plastovém obalu. Jsou umístěna ve třech výškových úrovních; tj. počítáno od hrany římsy **200 mm**, **650 mm** a **1100 mm** (Obr. 133). Lanka (přímá i kotvící) se kotví na krajních sloupcích pomocí ocelových ok a lanových svorek a prochází volně skrz středové sloupky otvorem o průměru 12 mm (Obr. 139). Pomocí vysokopevnostních napínáků typu [5] je do **horního** lanka vnesena síla  $F_p = 1,0 \text{ kN}$ . Krajní sloupky se mohou (nemusí) pomocí skloněných lanek přikotvit do říms pod úhlem **30-60°** a ulevit tak namáhání krajních sloupků. V rámci této práce se zvolil jednotný úhel pro všechny modely; **45°**.

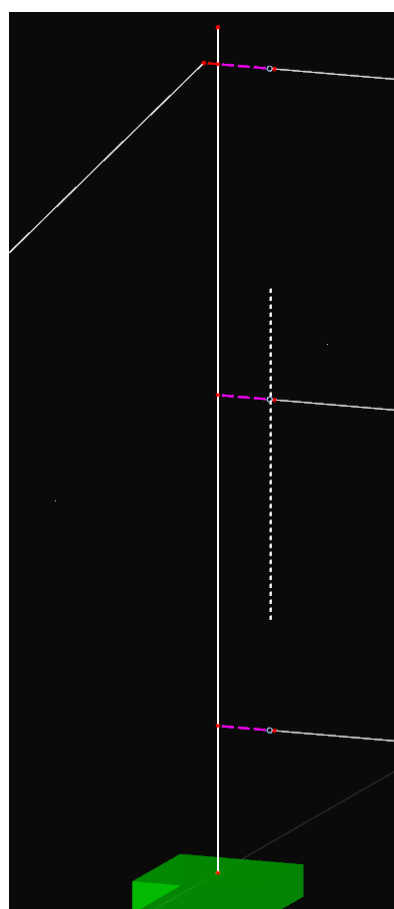


Obr. 139 Lankové zábradlí - pohled

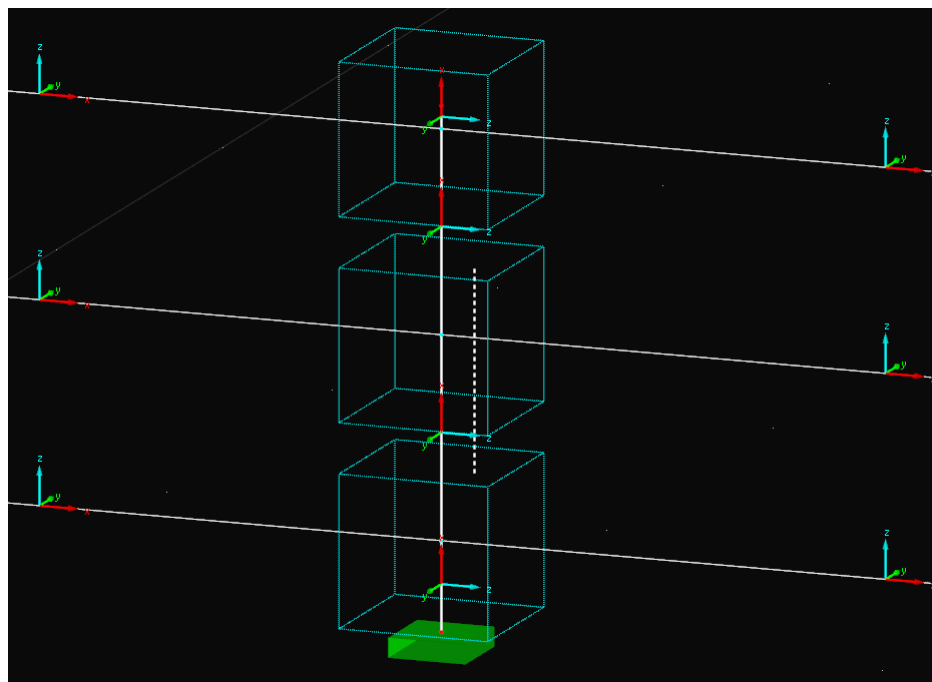
Program RFEM 5 umožňuje vymodelovat lanka jako pruty typu Lano, kterým se přiřadí 1D izotropní nelineární elastický materiálový model s vlastními parametry meze kluzu, resp. pevnosti drátů či modulu zpevnění. Pevnost lana, tj. mez kluzu je dle ČSN EN 12385-4 volena  $f_y = 1770 \text{ MPa}$ . Součinitel spolehlivosti oceli je zvolen  $\gamma_M = 1,10$ . Konstrukční problém připojení lanek (přímých i kotvících) ke sloupkům je v modelu řešen pomocí tuhých vazeb typu vetknutí-klob (nebo klob-vetknutí) (Obr. 140, Obr. 141). Průchod lanek středovými sloupky je umožněn pomocí příkazu Uzlové uvolnění, který povoluje zadání uživatelského kloubu do uzlu a uvolnění posunu prutů sdílející ten samý uzel. V tomto případě se do míst křížení lanek a sloupků zadaly všesměrné klouby s umožňujícím posunem ve směru podélných lokálních os lanek, tedy X. Zároveň se provedlo uvolnění prutů typu Lano v místě křížení (Obr. 142, Obr. 143). Předpínací síla je v programu zavedena pomocí teploty, tj. ochlazení horního lanka.



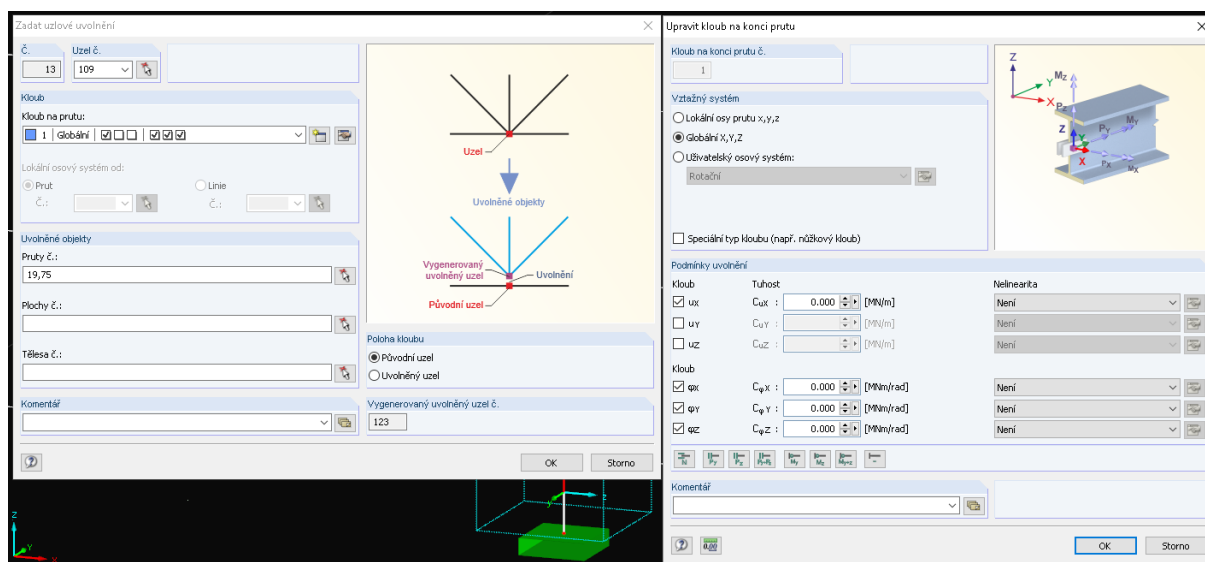
Obr. 140 Vazby klob – vetknutí (červené) a vetknutí – klob (fialové) jako připojení lanek ke sloupkům



Obr. 141 Vazby klob – vetknutí (červené) a vetknutí – klob (fialové) jako připojení lanek ke sloupkům



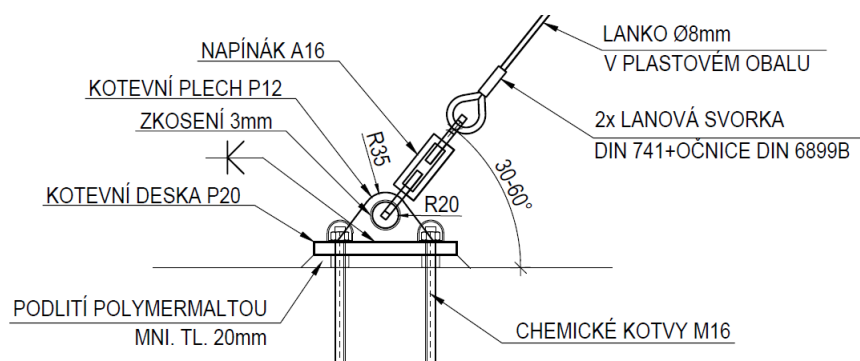
Obr. 142 Uzlová uvolnění na středovém sloupku jak je zobrazuje program RFEM 5



Obr. 143 Nastavení uzlového uvolnění a kloubu na konci prutu v programu RFEM 5

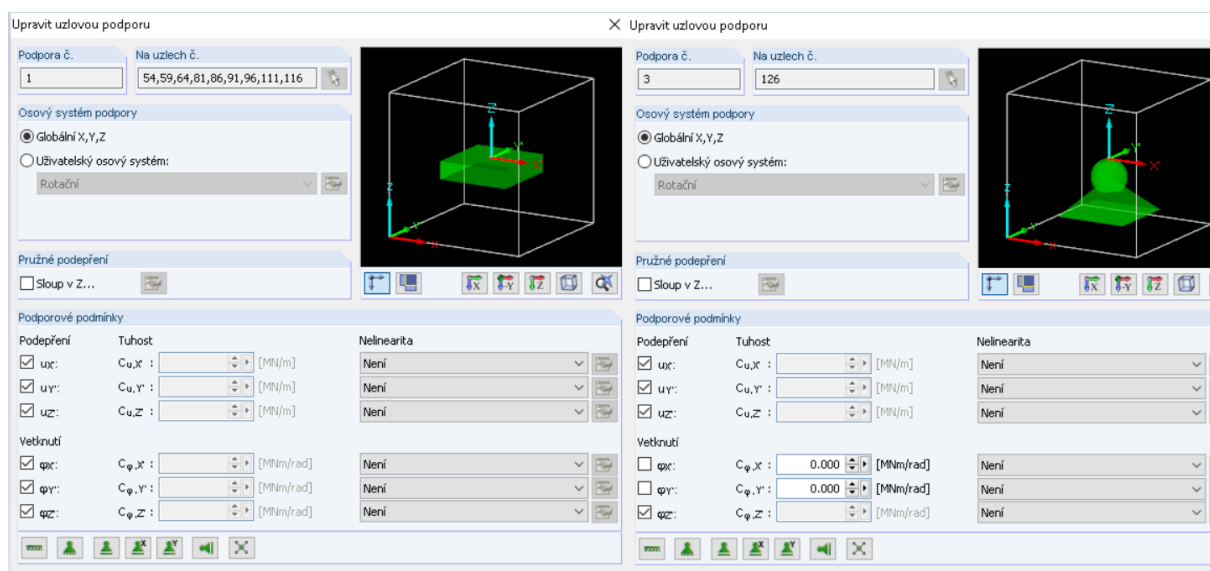
### 3.1.3. Podpory a kotvení

Uvažuje se s předpokladem, že konstrukční systém kotvení zábradlí umožní dostatečný dilatační posun ve všech jeho podporách tak, aby silové a deformační účinky teplotního zatížení byly eliminovány. Kotvení sloupků i lanek do říms se obvykle provádí pomocí patních či kotevních desek a chemických kotev M10 nebo M12, které fungují na bázi pryskyřic, viz [7] a [8]. Kotvení lanek navíc pomáhá např. speciální svislý kotevní plech s otvorem, viz Obr. 144.



Obr. 144 Příklad kotvení lanka do římsy

V modelu programu RFEM 5 bylo kotvení sloupků zadáno jako Uzlová podpora s posuvným i kloubovým podepřením ve všech směrech, tj. vetknutí. Kotvení lanka k zemi se zadalo jako Uzlová podpora s pouze posuvným podepřením ve všech směrech, tedy kloub (Obr. 145).



Obr. 145 Uzlové podpory vetknutí a kloub v programu RFEM 5

V rámci této práce je řešen konkrétní návrh kotvení lanek do římsy, pomocí rozhodujících vnitřních sil v kotvicím lanku a softwaru Hilti PROFIS Anchor [9]. Více dále. (kap. 3.4.6)

### 3.1.4. Parametry výpočtu

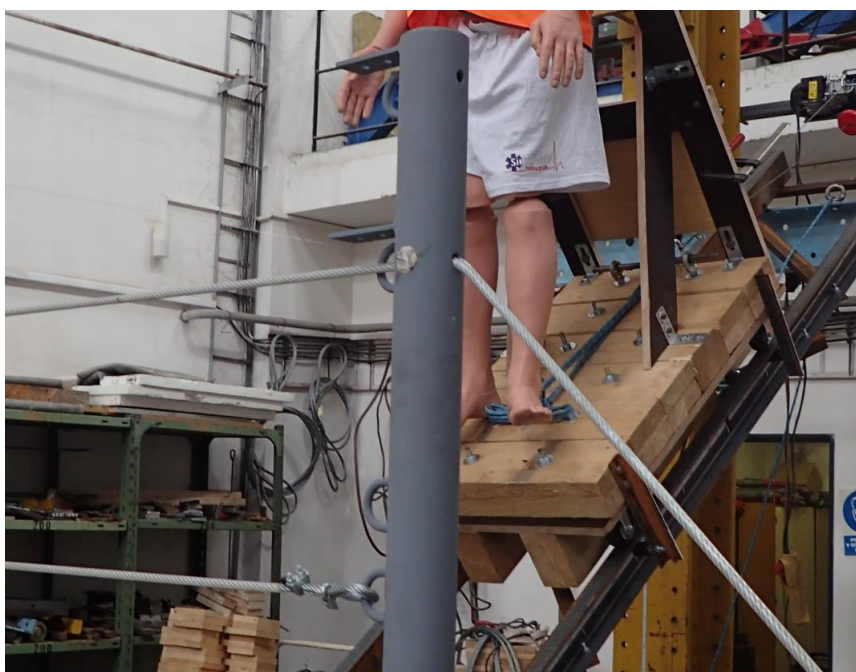
Pro chování lanek jsou charakteristické velké deformace – tedy elastické přetvoření větší než 1%. Proto je nutné respektovat, že mezi počáteční nedeformovanou geometrií a koncovou deformovanou geometrií existují značné rozdíly. Toto matematicky nejlépe vystihuje analýza velkých deformací, resp. teorie III. řádu. Jedná se o nelineární metodu výpočtu, která zohledňuje při analýze vnitřních sil podélné i příčné síly, více např. v [10]-[13]. Obecně vede k soustavě nelineárních algebraických rovnic, které lze řešit některou z šesti metod, které program RFEM 5 nabízí. Výpočet byl prováděn metodou Newton-Raphson. Při ní se nelineární soustava rovnic řeší iterační numerickou metodou tečen. Více např. viz [14] a [15].



### 3.1.5. Rozdíly výpočtového modelu s experimentem

Již výše bylo řečeno, že existují změny v geometrii i v typech průřezu mezi experimentem a modelem. Jiné výškové rozložení lanek či jiný průřez ovšem výrazněji neovlivňují celkový způsob chování zábradlí. Největší rozdíl, ke kterému bylo v rámci řešení fungování modelu přistoupeno, je průchod horního lanka krajním sloupkem a jeho přikotvení k zemi (Obr. 146). Z praktické logiky věci je jasné, že tahová **normálová síla v lanku** je po celé délce (tedy i po průchodu sloupkem a výškové změně směru) **stále stejná**. Ve výpočtových programech, které autor využíval k modelování ([2] a [16]), nelze takovýto konstrukční průchod lanka sloupkem výstižně a důvěryhodně zrealizovat. Po emailové konzultaci s pracovníkem firmy SCIA CZ s.r.o. bylo zjištěno, že ve zlomu se normálová síla vždy lehce změní, jelikož je možné zadat posun buďto vodorovně nebo svisle. Takovýto model nemůže být použit k návrhu, protože v něm není jistota skutečného působení zábradlí.

Tento problém byl obejit tím, že v modelech se průchod lanka krajním sloupkem vůbec neuvažoval a připojení kotvicího lanka bylo řešeno pomocí **tuhé vazby** (viz kap. 3.1.2). Je to řešení, které poněkud mění působení právě kotveného krajního sloupku; převážně hodnotu ohybového momentu, resp. napětí, kolmo na rovinu zábradlí. Nicméně řešení tuhou vazbou alespoň dává výsledky, za které se autor může zaručit. Chování takového modelu totiž odpovídá skutečnému chování zábradlí, kde by připojení lanek na sloupky bylo realizováno pomocí ocelových ok. Autor ovšem uvažuje, že krajní sloupek s průchodným lankem je celkově méně využit než ten s neprůchodným lankem, z důvodu menší deformace sloupku. V takovém případě se více deformuje průchodné lanko. Dá se tedy uvažovat, že návrh sloupků pomocí modelu s neprůchozími lanky je na straně bezpečnosti.



Obr. 146 Průchod horního lanka kotveným sloupkem při experimentu

## 3.2. Zatížení

### 3.2.1. Stálá zatížení – vlastní tíha $G_k$

Vlastní tíha prvků zábradlí se uvažuje jako rovnoměrné spojité zatížení  $g_k$  určené charakteristickou hodnotou, vypočtenou z rozměrů prvků a objemové tíhy základního materiálu dle kap. 5.2 ČSN EN 1991-1-1 (03/2004) a kap. 4.1.2 ČSN EN 1990 ed. 2 (05/2015).

V tomto případě, kdy je zábradlí tvořeno ocelovými lanky lze účinek vlastní tíhy lanek zanedbat s ohledem na její malou hodnotu. V rámci výpočtu MKP modelem se vlastní tíha generuje samostatně a má vlastní zatěžovací stav.

### 3.2.2. Proměnná zatížení – Q

#### 3.2.2.1. Zatížení dopravou $P_{j,k}$

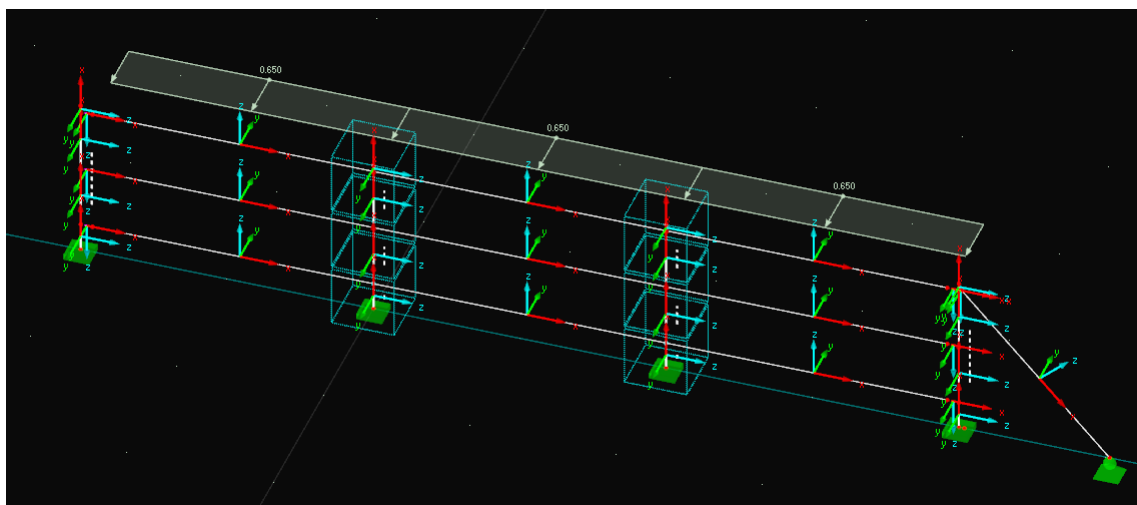
Toto zatížení je definováno jako spojité rovnoměrné [kN/m] zatížení ve vodorovném nebo svislém směru, působící na lanka. Zatěžují se pouze horní lanka, protože zatížením dopravou je myšleno působení davem lidí na lanka v podobě tlačení do lanek nebo sezení na nich. Vodorovné zatížení může obecně působit z obou stran, směr působení svislého zatížení se předpokládá pouze ve směru gravitace. Poloha tohoto proměnného zatížení se pro určení extrémních účinků uvažuje vždy v té nejnepríznivější možné poloze. V tomto případě je umístěno na všechna horní lanka, které se v uvažovaném výpočetním modelu vyskytují.

Charakteristické hodnoty zatížení jsou uvažovány dle výsledků provedeného experimentu. Ve výpočtových modelech jsou tedy generovány hodnoty svislého spojitého zatížení  $p_{v,k}$  a vodorovného spojitého zatížení  $p_{h,k}$  dle kap. 2.6.2.4 a 2.6.2.6:

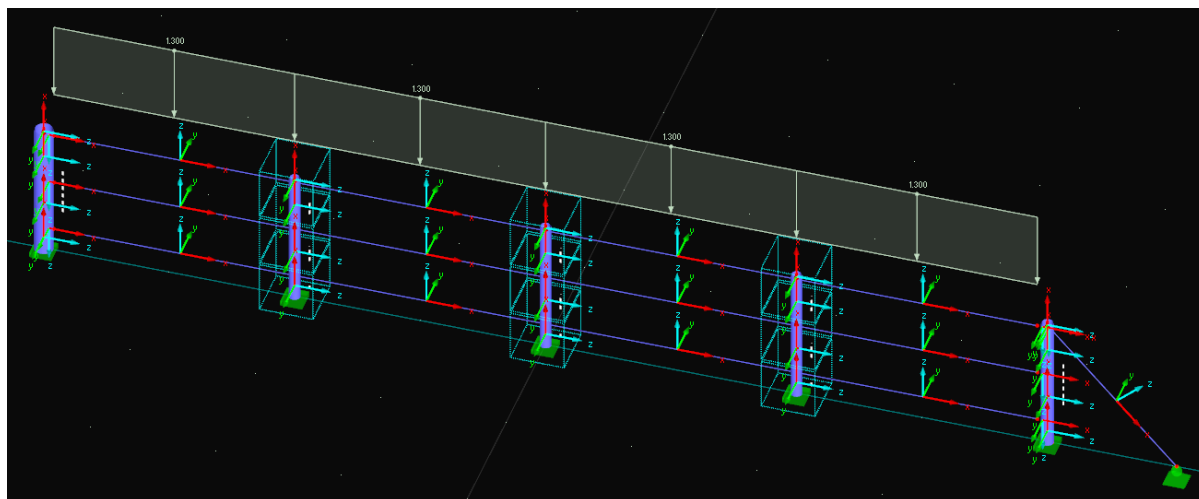
$$p_{v,k} = 1,3 \text{ kN/m},$$

$$p_{h,k} = 0,65 \text{ kN/m}.$$

Grafický příklad působení zatížení je ukázán na následujících obrázcích.



Obr. 147 Příklad zatížení zábradlí vodorovnou dopravní silou (tlačení do lanka davem lidí)



Obr. 148 Příklad zatížení zábradlí svislou dopravní silou (sezení na lanku davem lidí)

### 3.2.2.2. Zatížení teplotou $T_k$

Pro působení zatížení teplotou se předpokládá, že konstrukční systém kotvení zábradlí, viz kap. 3.4.6, běžně umožní dostatečný dilatační posun ve všech jeho podporách (posun v otvorech kotevních šroubů a prokluz kotevních desek) tak, aby silové a deformační účinky rovnoběžné složky teploty  $\Delta T_{u,k}$  byly eliminovány. Tyto účinky se pak pro posouzení zábradlí neuvažují.

Charakteristické hodnoty rovnoměrné složky teploty  $\Delta T_{u,k}$  dle kap. 5.2(5) ČSN EN 1991-1-5 se určí jako rozdíl mezi průměrnou maximální nebo minimální teplotou v ČR, znázorněnou v národních mapách izoterm a výchozí teplotou konstrukce:

$$\Delta T_{u,k} = T_{max/min} - T_0.$$

Tedy dle obr. NA.1 a NA.2 ČSN EN 1991-1-5 je:

$$T_{\mu,max} = 36 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ a}$$

$$T_{\mu,min} = -32 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Pokud se uvažuje výchozí teplota ocelové konstrukce jako  $T_0 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tak celkové maximální oteplení zábradlí je:

$$\Delta T_{u,exp} = -T_0 + T_{\mu,max} + 20 = -10 + 36 + 20 = 46 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

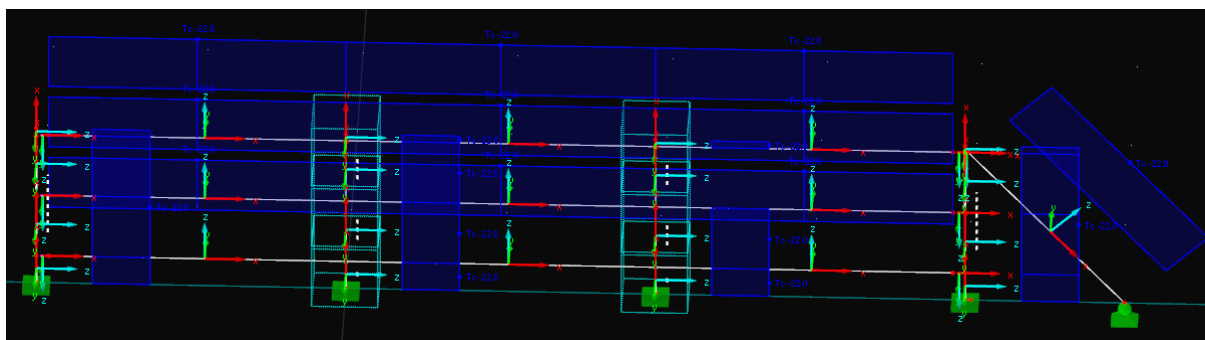
Připočtených  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  zahrnuje vliv barvy povrchu sloupků i lanek. S ohledem na to, že lanko je zabalené v ochranném plastovém obalu světlé barvy, tak se dle tab. 5.2 ČSN EN 1991-1-5 uvažuje konzervativní hodnota  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Celkové maximální ochlazení zábradlí je:

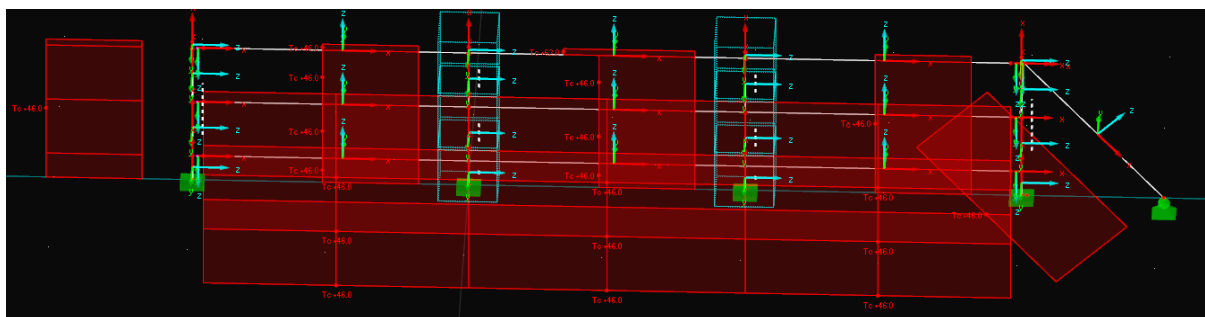
$$\Delta T_{u,con} = T_0 + T_{\mu,min} = 10 - 32 = -22 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ve výpočtových modelech MKP jsou vytvořeny zatěžovací stavy pro oteplení a ochlazení a jsou zatíženy všechny prutové prvky zábradlí, tj. všechna lanka a všechny sloupky.

Příklad aplikace teplotního zatížení je znázorněno na Obr. 149 a Obr. 150.



Obr. 149 Model zábradlí zatížen ochlazením



Obr. 150 Model zábradlí zatížen oteplením

### 3.2.3. Mimořádná zatížení – A

#### 3.2.3.1. Zatížení od pádu osob $A_a$

Mimořádné zatížení od pádu osob se uplatní v případě prvků, které slouží k zajištění pádu, v tomto případě lanka, případně samotný vnitřní sloupek. Zde se uvažuje zatížení osamělými silami, působící vodorovně i svisle.

Charakteristické hodnoty těchto sil vycházejí z naměřených hodnot z provedeného experimentu. Maximální účinky nárazu bylo naměřeno během 2. ZS (kap. 2.6.2.2), kde byla odvozena síla nárazu do horního lanka o hodnotě:

$$F_{Ed,2ZS} = 5,44 \text{ kN},$$

působící na lanko pod úhlem dopadu  $38,66^\circ$ , daný sklonem přilehlého svahu  $1:1,25$ .

Tato síla je rozkladem do složek přepočítána a zaokrouhlena na svislou  $F_{Ed,v}$  a vodorovnou  $F_{Ed,h}$  složku o hodnotě:

$$F_{Ed,1,v} = 3 \text{ kN} \text{ a}$$

$$F_{Ed,1,h} = 4 \text{ kN},$$

působící na horní lanko v místě osy jeho sloupků.

Z logiky pádu osoby do zábradlí je jasné, že napětí vyvolané v patách sloupků je způsobeno silou přenášenou jak z horních lanek, tak z obou spodních. Během experimentu se ovšem síla ve spodních lankách neměřila, je nutné je logicky odhadnout a zpětně zkontrolovat. Síly do ostatních lanek jsou tyto:

Střední lanka:

$$F_{Ed,2,v} = 2 \text{ kN a}$$

$$F_{Ed,2,h} = 2,4 \text{ kN.}$$

Spodní lanka:

$$F_{Ed,3,v} = 1 \text{ kN a}$$

$$F_{Ed,3,h} = 1,2 \text{ kN.}$$

*Poznámka:* z rozložení váhy jednotlivých tělesných částí bylo odhadnuto, že horní lanko přenesou sílu od nárazu hlavy, krku, většinu paží a trup, což je např. dle [18] dohromady cca 41 kg. Střední lanko přenesou váhu pánve, rukou a cca půlku nohou, tj. dohromady cca 26 kg. A spodní lanko přenáší váhu zbytku novou, takže cca 13 kg. Z toho plyne, že hodnota sil od pádu osoby je zhruba dvoutřetinová ve středním lanku a třetinová ve spodním lanku. Je vycházeno z klasického rozložení váhy lidského těla o tíze cca 80 kg.

Poloha tohoto zatížení se pro určení extrémních účinků uvažuje vždy v té nejneprůzračnější možné poloze. V tomto případě je umístováno vždy na osu dvou sousedících sloupků do různých polí na různých výpočtových modelech MKP. Pro každou polohu je vytvořen vlastní zatěžovací stav.

**Speciální zatěžovací stav** je vytvořen pro případ pádu osoby nikoliv do lanek zábradlí, ale na vnitřní sloupek. Zde se sečtou všechny svislé a vodorovné síly a zatíží se jimi horní konec sloupku, tj. ve výšce **1150 mm**. Na účinky tohoto zatížení se navrhne **dimenze vnitřních sloupků**.

### 3.2.4. Dílčí součinitele zatížení

Dílčí součinitele zatížení se uvažují v souladu s ČSN EN 1990 ed. 2. Jejich rekapitulace pro tento případ je uvedena níže, viz **Error! Reference source not found.**

Tabulka 1 Dílčí součinitele zatížení  $\gamma_F$

ULS - návrhová situace			trvalá/ dočasná		mimořádná	
účinek zatížení			nepříznivý	příznivý	nepříznivý	příznivý
zatížení			$\gamma_{G,sup}$	$\gamma_{G,inf}$	$\gamma_{G,sup}$	$\gamma_{G,inf}$
<b>stálé</b>	vlastní tíha	<b>G</b>	1,35	1,00	1,00	1,00
zatížení			$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$
<b>proměnné</b>	doprava	<b>P</b>	1,45	0,00	1,00	0,00
	teplota	<b>T</b>	1,50	0,00	1,00	0,00
<b>mimořádné</b>	náraz	<b>A</b>	-	-	1,00	-

### 3.2.5. Součinitele kombinace $\Psi_i$

Je uvažováno pouze s kombinační ( $\Psi_0$ ) hodnotou proměnného zatížení dle tabulky A2.3 ČSN EN 1990 ed. 2 (05/2015) pro železniční mosty. Pro tento případ platí následující tabulka.

Tabulka 2 Součinitele kombinací  $\Psi$  pro zábradlí na železničních mostech

součinitel	hodnota	G	P	T	A
		stálé	proměnné		mimořádné
		vlastní tíha	doprava	teplota	náraz
$\Psi_0$	kombinační	-	0,8	0,6	-

Součinitele zatížení i součinitele kombinace jsou zadány přímo během nastavení kombinací v použitém výpočetním MKP programu.

## 3.3. Posouzení na mezní stav únosnosti ULS

### 3.3.1. Návrhové kombinace zatížení

Pro návrh a posouzení zábradlí v ULS se návrhové hodnoty zatížení stanoví dle tabulky A2.4 (B) ČSN EN 1990 ed. 2 (05/2015) - soubor B STR/GEO. Pro sestavení kombinací stálých a proměnných zatížení se použije výraz z následující tabulky.

Tabulka 3 Kombinační předpis pro ULS

	Stálá zatížení	Předpětí	Proměnná zatížení	Mimořádné zatížení
	Nepříznivá			
Kombinační výraz	$\gamma_{Gj,sup} * G_{kj,sup}$	P	$\gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$	$\gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$

Pro potřeby posouzení rozhodujících prvků zábradlí se vytvoří kombinace obsahující vždy kombinaci vlastní tíhy, zatížení kladnou/zápornou teplotou, a svislé/vodorovné dopravní zatížení nebo zatížení pádem, uvažované jako mimořádné.

### 3.3.2. Posudek – ULS

Jednotlivé rozhodující nosné prvky zábradlí se posuzují v ULS plastickým výpočtem na únosnost při namáhání kombinací osově síly  $N_x$  a prostorového ohybu  $M_y+M_z$ , včetně uvážení případného vzpěru u sloupků dle ČSN EN 1993-1-1 ed. 2 (07/2011) a ČSN EN 1993-2 (01/2008).

## 3.4. Výsledky a jejich vyhodnocení

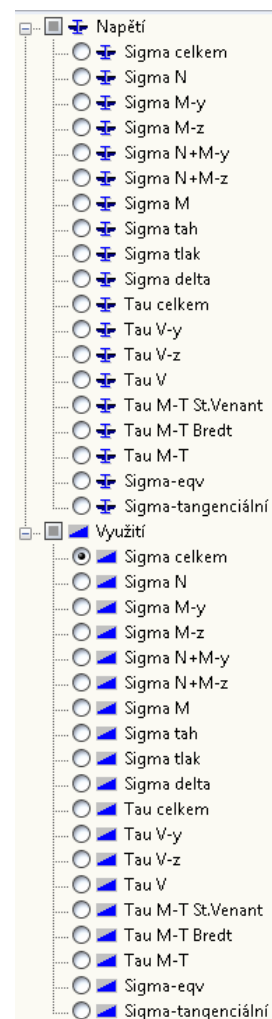
V této podkapitole jsou popsány výsledky účinků zatížení a poté návrhy dimenzí sloupků a lanek pro různé délky zábradlí. Samotný návrh je proveden na modelech vodorovných zábradlí rozdílné délky a poté jsou navrhnuté profily aplikovány na modely zábradlí se sklonem a na sestavy zábradlí a kontrolováno jejich využití na shodné zatížení.

Návrh a kontrola je prováděna v programu RFEM 5 pomocí jeho přídatného modulu RF-STEEL Members – Obecná analýza napětí ocelových prutů. Ten umožňuje nechat si vykreslit na konstrukci průběhy celkového napětí, příp. jen některou z jeho složek. Zároveň dovoluje vykreslení využití prutů pro různé typy napětí. (Obr. 151)

V rámci každého modelu zábradlí konkrétní délky je vytvořeno více druhů zábradlí dle podmínek kombinace kotvení krajních sloupků. Jsou tedy buď kotveny oba nebo pouze jeden nebo žádný.

**Kombinace zatížení**, způsobující největší namáhání prvků je vždy, na všech modelech, kombinace zatěžovacích stavů **Vlastní tíhy**, **Ochlazení** a **Pádu/Nárazu** osoby do nejhorsího místa. K návrhu dimenzí je tedy použita vždy tato kombinace.

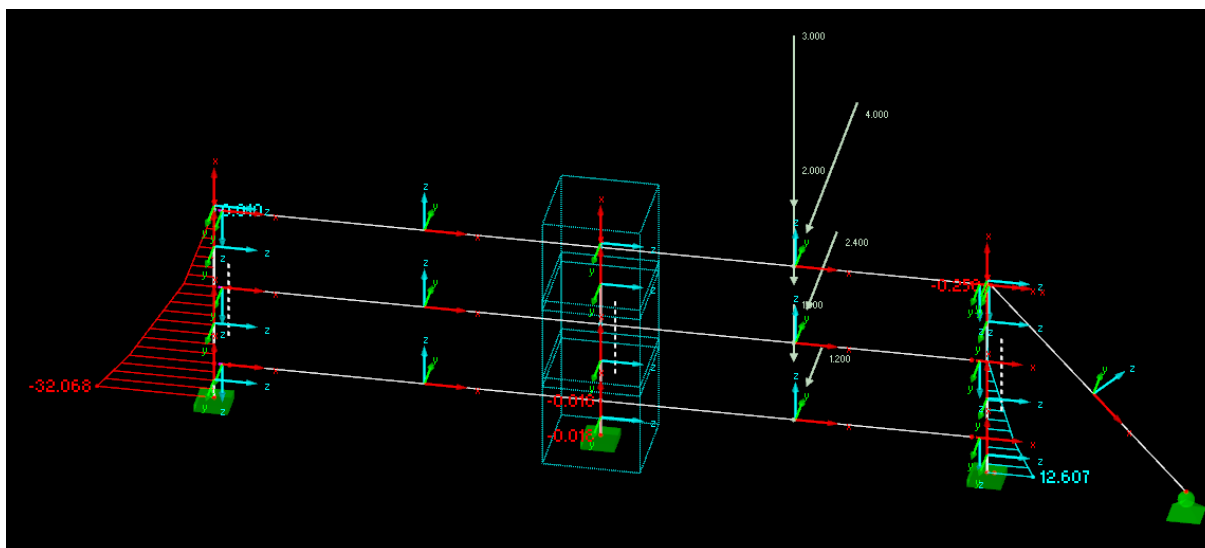
Navrhnuté dimenze profilů jsou v rámci každého modelu zábradlí tabulkově posouzeny dle 3.3.2. Obecný postup posouzení je rozepsán v Příloze 1.



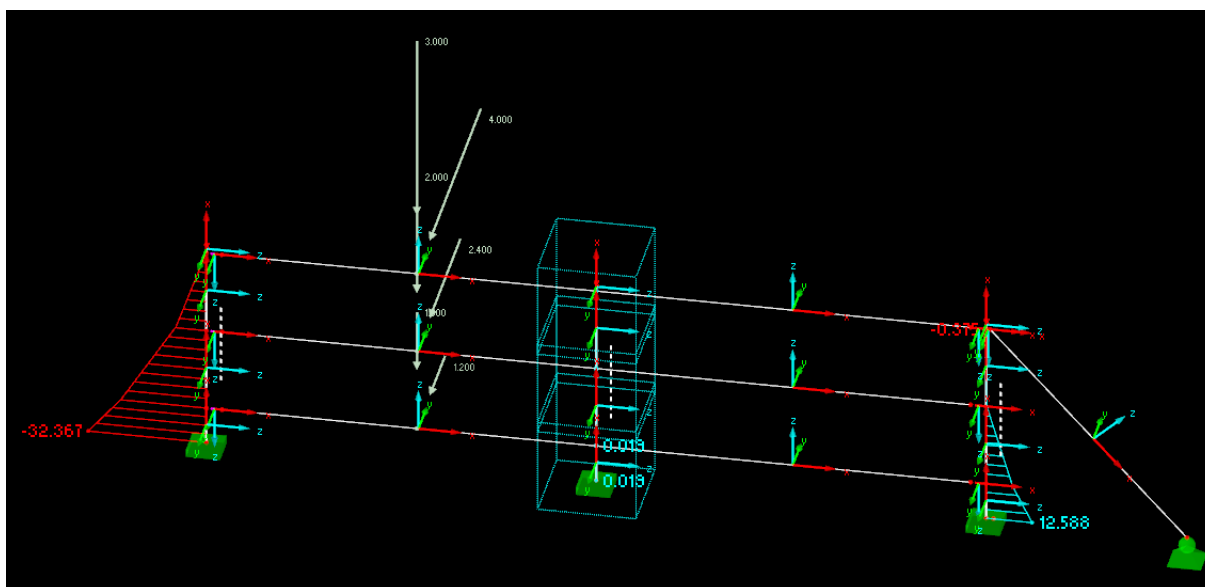
Obr. 151 Možnosti modulu RF-STEEL Members

### 3.4.1. Délka zábradlí – 4 m

Jedná se o model o dvou polích délky 2,0 m. Je vytvořen dle kap. 3.1 a je na něm aplikováno zatížení dle kap. 3.2. Mimořádné zatížení nárazem osoby je umístěno na obě pole a jsou pro něho vytvořeny dva zatěžovací stavy, ovšem z výsledků je zřejmé, že účinky obou zatěžovacích stavů jsou velmi podobné. (Obr. 152, Obr. 153). V tomto případě tedy nezáleží, kam osoba dopadne.



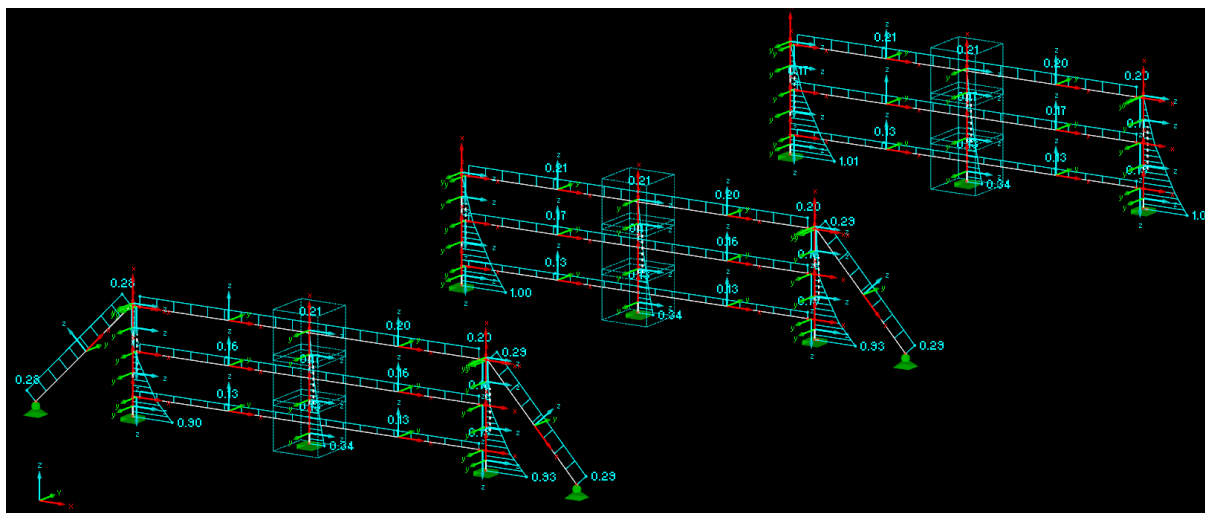
Obr. 152 Poloha zatížení nárazem 1 a jím způsobený  $M_y$



Obr. 153 Poloha zatížení nárazem 2 a jím způsobený  $M_y$

Z ladění modelu vyšlo, že kotvený sloupek má trubkový profil  $\text{Ø}102/10$ , zatímco ten nekotvený má profil  $\text{Ø}159/8$ . Pro středový sloupek vychází, po jeho zatížení nárazem, profil  $\text{Ø}89/8$ . Výsledné napětí, využití a posouzení všech prvků je vidět na následujících obrázcích a v tabulce. (K.K.S. – kotvený krajní sloupek, N.K.S. – nekotvený krajní sloupek, S.S. – středový sloupek)





Obr. 154 Vykreslení využití prvků na účinky nejhoršího zatížení

Tabulka 4 Posouzení prvků v modelu

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S.	N.K.S.	S.S.	
Profil	Ø102/10	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-22,100	-3,500	-3,200	18,200
$M_{y,Ed}$ [kNm]	12,429	32,200	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,100	3,200	3,000	-
$A$ [m <sup>2</sup> ]	0,002890	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000085	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	617,409	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,891</b>	<b>0,912</b>	<b>0,274</b>	<b>0,225</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 4 a Obr. 154 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují pro všechny kombinace kotvení krajního sloupku na účinky nejhoršího zatížení.

Na skutečných mostních konstrukcích se zábradlí neumísťuje pouze na vodorovné římsy. Často naopak bývají realizována na skloněných římsách. Tím vzniká otázka, jak si navržené profily z Tabulka 4 Posouzení prvků v modelu povedou na modelech skloněných zábradlí při účincích stejného zatížení. Zábradlí bylo tedy modelováno i ve sklonech **1:4**, **1:2** a **1:1**. Jejich posouzení je zobrazeno v následujících tabulkách.

Tabulka 5 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:4

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/10	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-35,400	-11,700	3,200	19,800
$M_{y,Ed}$ [kNm]	12,900	33,400	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,300	3,300	2,900	-
$A$ [m <sup>2</sup> ]	0,002890	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000085	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	617,409	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,949</b>	<b>0,955</b>	<b>0,250</b>	<b>0,245</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 6 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:2

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/10	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-38,100	-17,900	-3,300	18,500
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,600	27,400	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,900	2,900	3,100	-
$A$ [m <sup>2</sup> ]	0,002890	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000085	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	617,409	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,805</b>	<b>0,799</b>	<b>0,283</b>	<b>0,229</b>

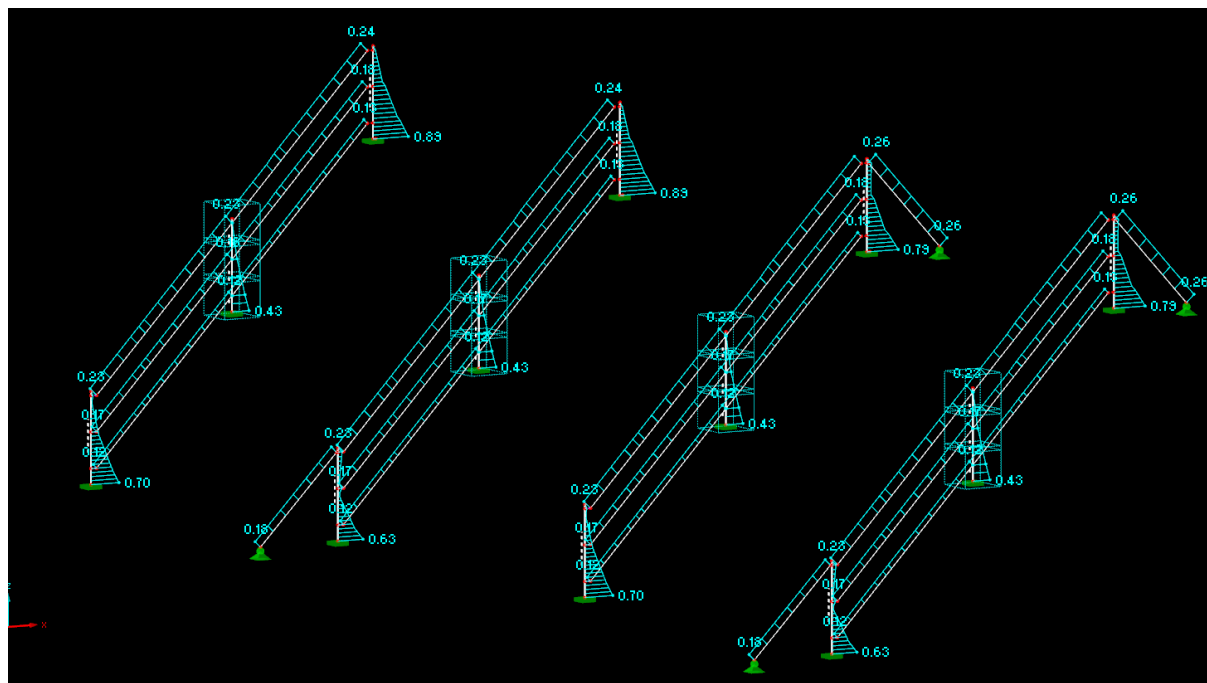
\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 7 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:1

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/10	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-53,500	-33,400	-3,800	21,500
$M_{y,Ed}$ [kNm]	9,900	27,200	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,500	2,500	3,800	-
$A$ [m <sup>2</sup> ]	0,002890	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000085	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	617,409	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	18,159	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,770</b>	<b>0,803</b>	<b>0,346</b>	<b>0,266</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

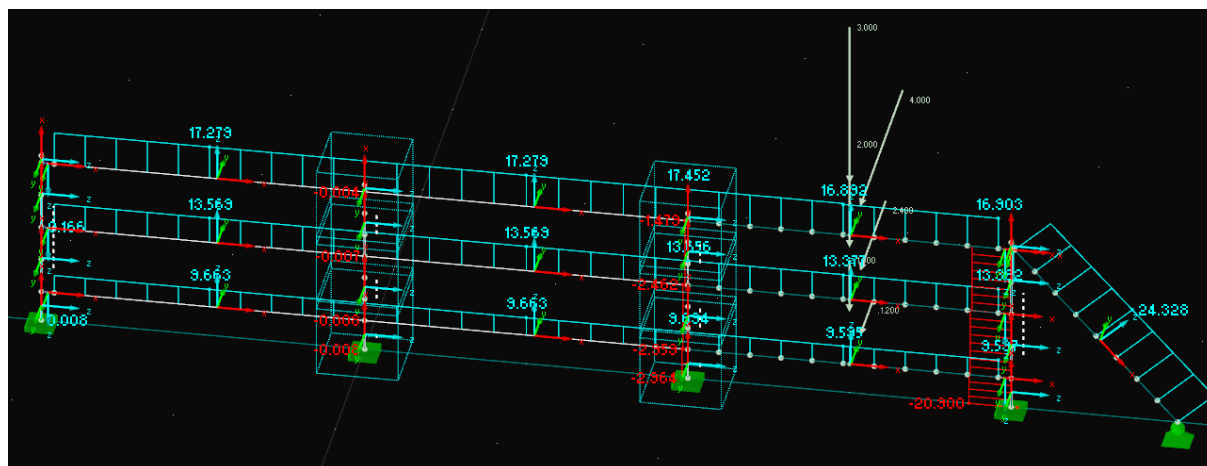
Tabulky 5-7 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují i na skloněných lankových zábradlích. Stojí za to si povšimnout, že normálová síla v krajních sloupcích se zvětšujícím sklonem roste, zatímco ohybové momenty klesají. Obecně však platí, že čím větší je sklon zábradlí, tím méně jsou sloupky využity. Příklad modelu zábradlí ve sklonu s vykresleným využitím je vidět na Obr. 155.



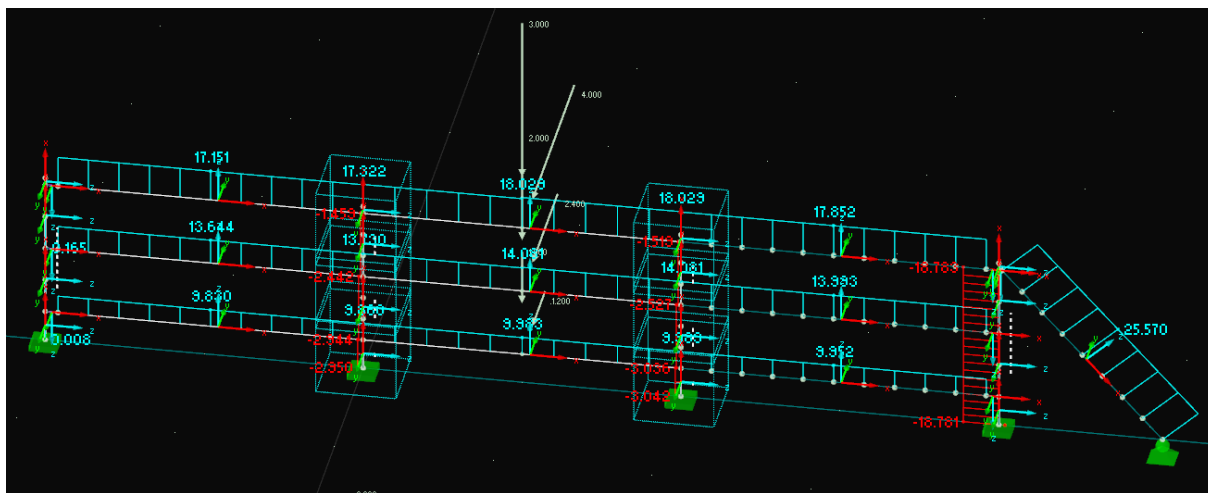
Obr. 155 Model lankového zábradlí ve sklonu 1:1 s vykresleným využitím

### 3.4.2. Délka zábradlí – 6 m

Tento model má tři pole délky 2,0 m. Je vytvořen dle kap. 3.1 a je na něm aplikováno zatížení dle kap. 3.2. Mimořádné zatížení nárazem osoby je umístěno na jedno krajní a střední pole a jsou pro něho vytvořeny dva zatěžovací stavy. Z výsledků je vidět, že účinky obou zatěžovacích stavů jsou velmi podobné, pokud jde o ohybové momenty. Avšak poloha u kraje způsobuje větší normálovou sílu v krajním sloupcu (Obr. 156, Obr. 157). Proto, co se týče zatížení nárazem, je pro návrh a posouzení nadále využívána pouze poloha u kraje.

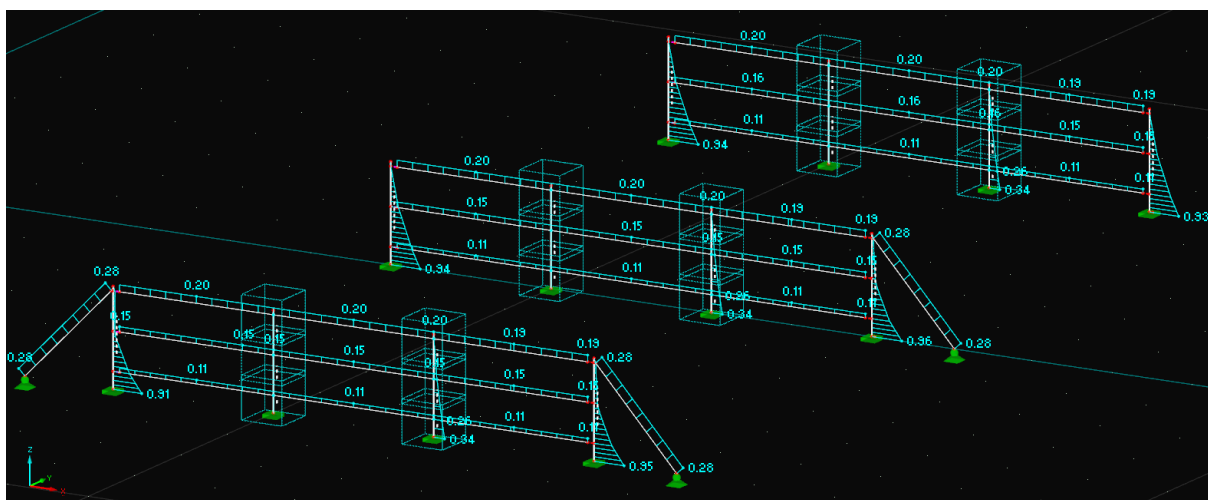


Obr. 156 Poloha mimořádného zatížení u kraje a vykreslená normálová síla, kterou způsobuje



Obr. 157 Poloha mimořádného zatížení ve středním poli a vykreslená normálová síla, kterou způsobuje

Z výsledků modelu vychází dimenze pro krajní kotvený sloupek  $\text{Ø}102/8$ , nekotvený  $\text{Ø}159/8$  a středový sloupek  $\text{Ø}89/8$ . Výsledné napětí, využití a posouzení všech prvků je vidět na následujících obrázcích a v tabulce. (K.K.S. – kotvený krajní sloupek, N.K.S. – nekotvený krajní sloupek, S.S. – středový sloupek)



Obr. 158 Vykreslení využití prvků na účinky nejhoršího zatížení

Tabulka 8 Posouzení všech prvků v modelu

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-21,600	-3,400	-3,300	17,700
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,700	30,400	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,100	3,200	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,954</b>	<b>0,866</b>	<b>0,274</b>	<b>0,219</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 8 a Obr. 158 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují pro všechny kombinace kotvení krajního sloupku na účinky nejhoršího zatížení.

Stejným způsobem jako v minulé kapitole, bylo i zábradlí délky 6 m modelováno i ve sklonech **1:4**, **1:2** a **1:1**. Jejich posouzení je zobrazeno v následujících tabulkách.

Tabulka 9 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:4

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-32,500	-14,000	-2,700	18,000
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,700	30,300	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,200	3,200	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,982</b>	<b>0,876</b>	<b>0,273</b>	<b>0,223</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 10 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:2

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-38,100	-21,900	-3,300	18,600
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,600	27,430	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,900	2,900	3,100	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,967</b>	<b>0,805</b>	<b>0,283</b>	<b>0,230</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

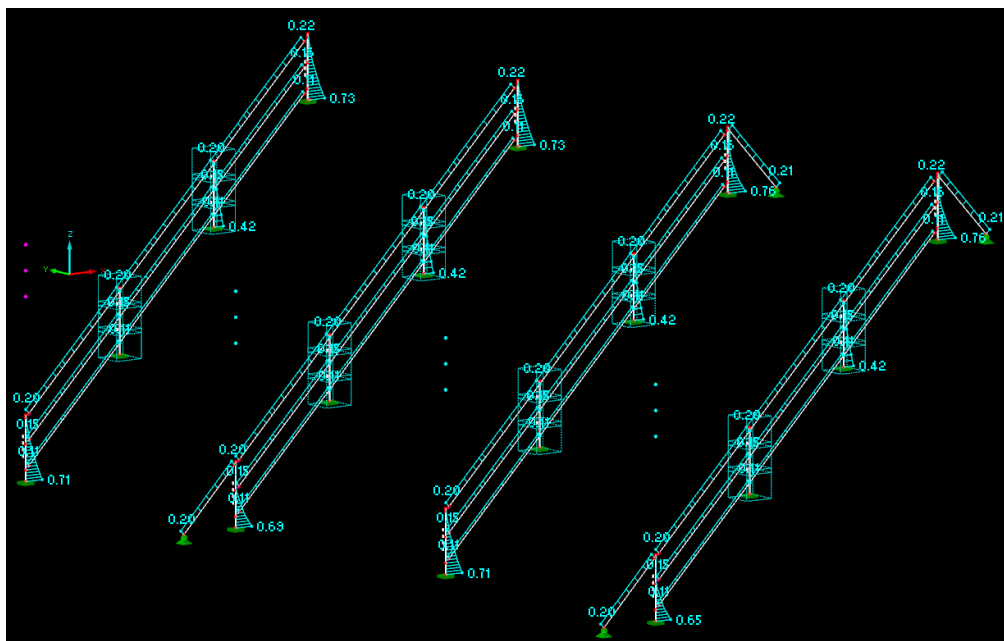
Tabulka 11 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:1

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø159/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-45,900	-32,400	-3,700	18,100
$M_{y,Ed}$ [kNm]	7,900	22,100	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,300	2,300	3,700	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003795	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000183	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	810,750	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	39,010	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,764</b>	<b>0,665</b>	<b>0,337</b>	<b>0,224</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulky 9-11 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují i na skloněných lankových zábradlích.

I zde, stejně jako v předchozí kapitole, normálová síla v krajních sloupcích se zvětšujícím sklonem roste, zatímco ohybové momenty klesají. Znovu platí, že čím větší je sklon zábradlí, tím méně jsou sloupky využity. Příklad modelu zábradlí ve sklonu s vykresleným využitím je vidět na Obr. 159.

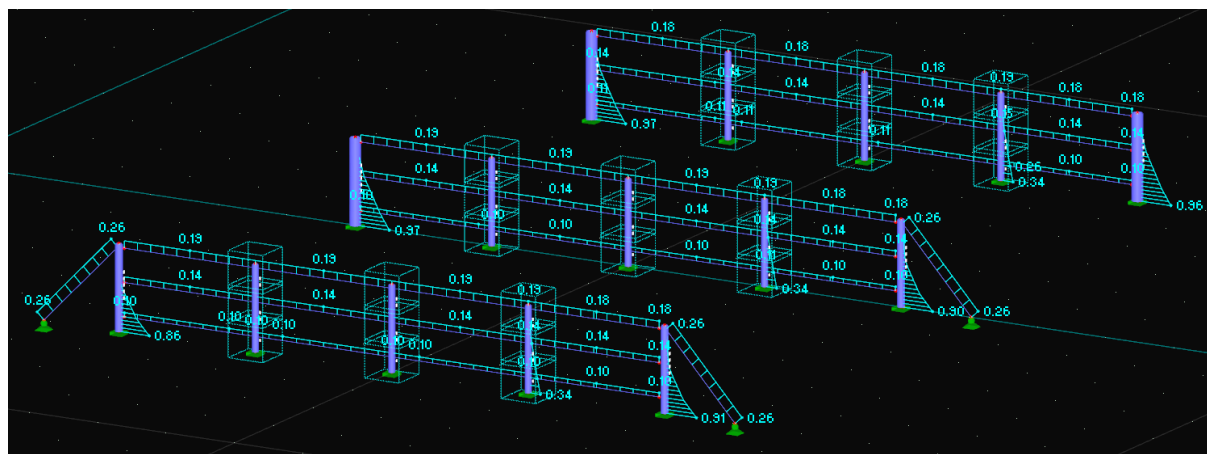


Obr. 159 Model lankového zábradlí ve sklonu 1:1 s vykresleným využitím

### 3.4.3. Délka zábradlí – 8 m

Následující model má pole čtyři, každé délky 2,0 m. Je vytvořen dle kap. 3.1 a je na něm aplikováno zatížení dle kap. 3.2. Podle důvodů zmíněných v předchozí kapitole, je rozhodující poloha mimořádného zatížení na krajním poli.

Z ladění modelu vychází tyto dimenze sloupků: krajní kotvený  $\text{Ø}102/8$ , nekotvený  $\text{Ø}152/8$  a středový sloupek  $\text{Ø}89/8$ . Výsledné napětí, využití a posouzení všech prvků je vidět na následujících obrázcích a v tabulce. (K.K.S. – kotvený krajní sloupek, N.K.S. – nekotvený krajní sloupek, S.S. – středový sloupek)



Obr. 160 Vykreslení využití prvků na účinky nejhoršího zatížení

Tabulka 12 Posouzení všech prvků v modelu

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-20,600	-3,500	-3,200	16,300
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,100	28,300	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,100	3,100	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,912</b>	<b>0,889</b>	<b>0,274</b>	<b>0,202</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 4 a Obr. 160 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují pro všechny kombinace kotvení krajního sloupku na účinky nejhoršího zatížení.

I zde, shodně jako v předchozích kapitolách, bylo i zábradlí délky 8 m modelováno ve sklonech **1:4**, **1:2** a **1:1**. Jejich posouzení je zobrazeno v následujících tabulkách.

Tabulka 13 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:4

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-29,200	-20,300	-3,300	17,500
$M_{y,Ed}$ [kNm]	10,200	28,600	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,000	3,000	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,929</b>	<b>0,917</b>	<b>0,274</b>	<b>0,216</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.



Tabulka 14 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:2

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-41,600	-28,800	-3,300	17,600
$M_{y,Ed}$ [kNm]	8,500	26,900	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,900	2,900	3,100	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,835</b>	<b>0,877</b>	<b>0,283</b>	<b>0,218</b>

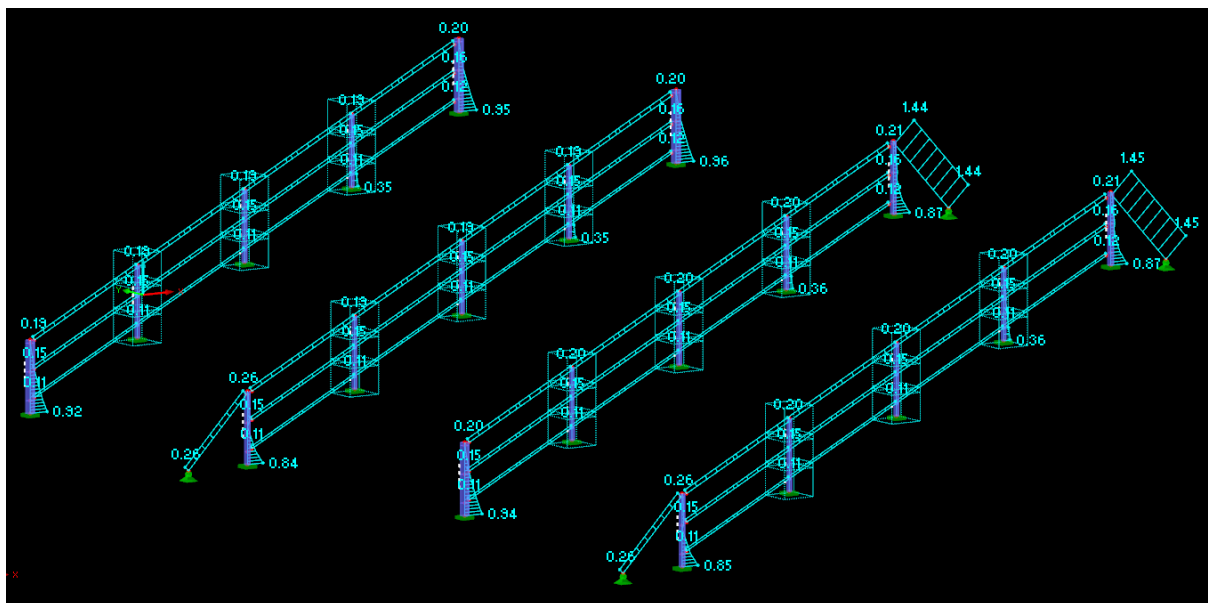
\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 15 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:1

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/8	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-48,400	-32,400	-3,600	18,000
$M_{y,Ed}$ [kNm]	6,700	21,800	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,300	2,300	3,700	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,002362	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000071	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	504,609	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	15,147	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,690</b>	<b>0,721</b>	<b>0,337</b>	<b>0,223</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulky 13-5 ukazují, že využití všech průřezů je menší než **1,0**. Navržené průřezy tedy vyhovují i na skloněných lankových zábradlích. Normálová síla v krajních sloupcích roste se zvětšujícím sklonem, zatímco ohybové momenty klesají. Obecně však platí, že čím větší je sklon zábradlí, tím méně jsou sloupky využity. Příklad modelu zábradlí ve sklonu s vykresleným využitím je vidět na Obr. 161.

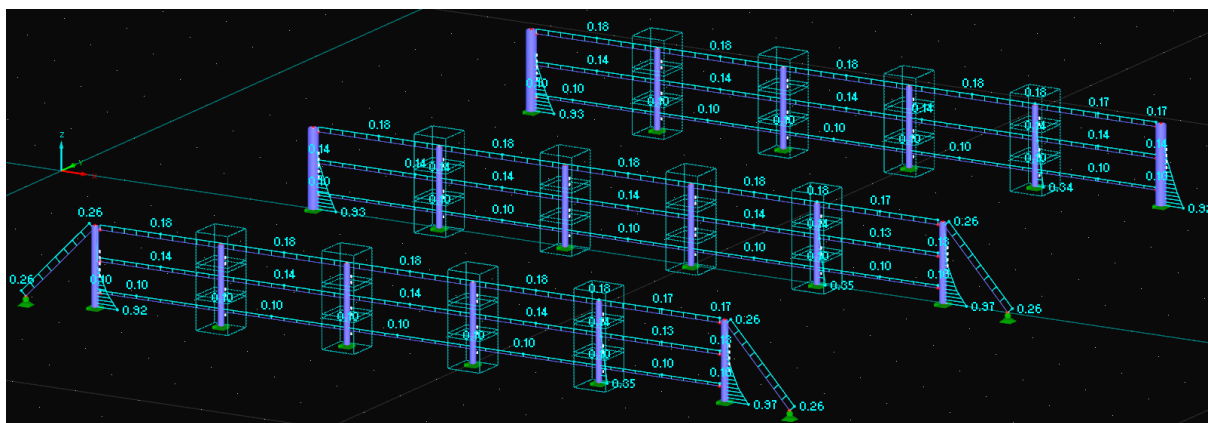


Obr. 161 Model lankového zábradlí ve sklonu 1:2 s vykresleným využitím

#### 3.4.4. Délka zábradlí – 10 m

Poslední z tohoto typu modelů má pět polí, každé délky 2,0 m. Je vytvořen dle kap. 3.1 a je na něm aplikováno zatížení dle kap. 3.2. Podle důvodů zmíněných v předchozích kapitolách, je rozhodující poloha mimořádného zatížení v krajním poli.

Navrhnuté a posouzené průřezy jsou tyto: kotvený sloupek má trubkový profil  $\text{Ø}102/10$ , nekotvený má profil  $\text{Ø}159/8$ . Pro středový sloupek vychází, po jeho zatížení nárazem, profil  $\text{Ø}89/8$ . Výsledné napětí, využití a posouzení všech prvků je vidět na následujících obrázcích a v tabulce. (K.K.S. – kotvený krajní sloupek, N.K.S. – nekotvený krajní sloupek, S.S. – středový sloupek)



Obr. 162 Vykreslení využití prvků na účinky nejhoršího zatížení

Tabulka 16 Posouzení všech prvků v modelu

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/6,3	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-20,500	-3,500	-3,300	16,000
$M_{y,Ed}$ [kNm]	8,800	27,100	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,100	3,100	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,001894	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000058	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	404,627	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>1,014</b>	<b>0,856</b>	<b>0,274</b>	<b>0,198</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 4 a Obr. 162 ukazují, že využití všech průřezů je menší nebo cca rovno než **1,0**. Překročení celkového využití krajního kotveného sloupku o 1,4% se dá uvažovat bezpečné, vzhledem k aplikaci součinitelů zatížení a materiálu. Navržené průřezy tedy vyhovují pro všechny kombinace kotvení krajního sloupku na účinky nejhoršího zatížení.

I zde, shodně jako v předchozích kapitolách, bylo i zábradlí délky 10 m modelováno ve sklonech **1:4**, **1:2** a **1:1**. Jejich posouzení je zobrazeno v následujících tabulkách.

Tabulka 17 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu **1:4**

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/6,3	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-29,200	-12,400	-3,200	16,400
$M_{y,Ed}$ [kNm]	8,700	26,600	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	3,100	3,100	3,000	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,001894	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000058	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	404,627	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>1,028</b>	<b>0,853</b>	<b>0,274</b>	<b>0,203</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 18 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:2

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/6,3	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-35,600	-19,900	-3,200	15,700
$M_{y,Ed}$ [kNm]	7,700	24,400	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,900	2,900	3,100	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,001894	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000058	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	404,627	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,946</b>	<b>0,795</b>	<b>0,283</b>	<b>0,194</b>

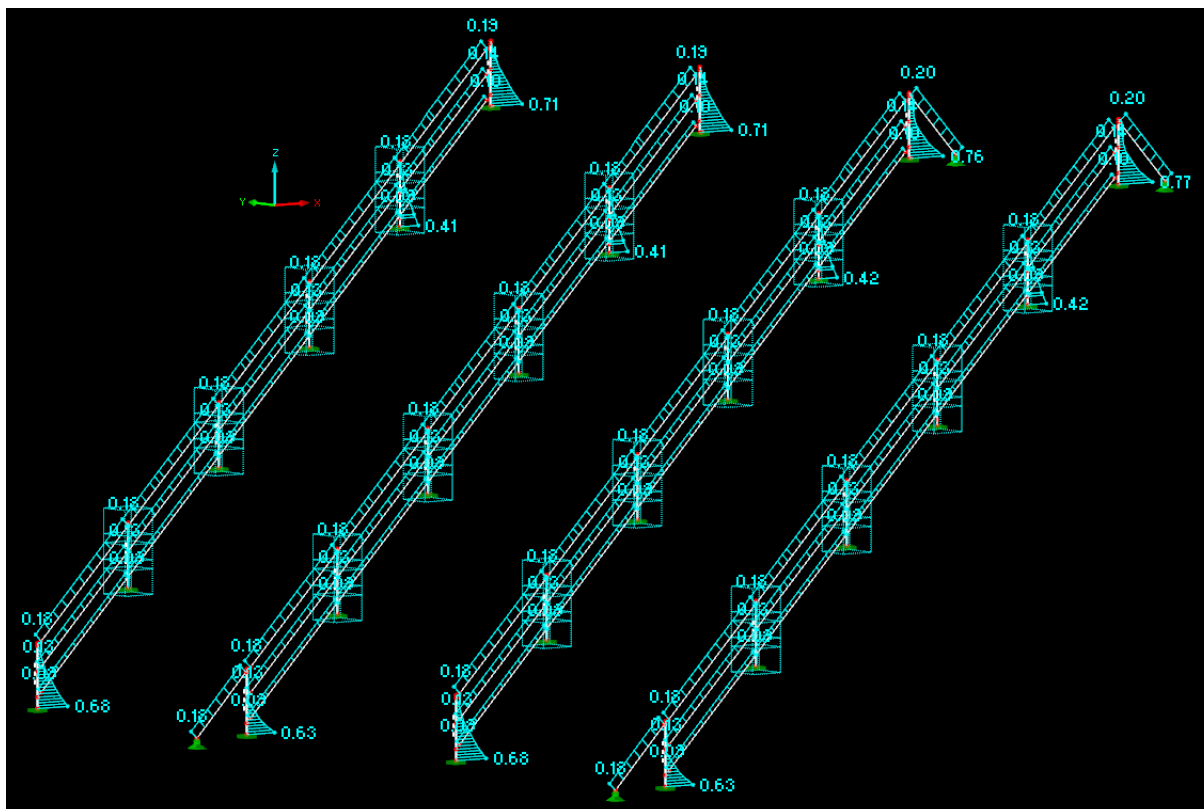
\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulka 19 Posouzení průřezů na modelu ve sklonu 1:1

	Sloupek			Lanko*
	K.K.S	N.K.S	S.S	
Profil	Ø102/6,3	Ø152/8	Ø89/8	Ø8
$N_{Ed}$ [kN]	-41,500	-28,900	-3,500	18,200
$M_{y,Ed}$ [kNm]	6,300	19,500	0,000	-
$M_{z,Ed}$ [kNm]	2,300	2,300	3,600	-
A [m <sup>2</sup> ]	0,001894	0,003619	0,002036	0,000050
$W_{pl}$ [m <sup>3</sup> ]	0,000058	0,000166	0,000053	-
$N_{Rd}$ [kNm]	404,627	773,150	434,964	80,882
$M_{y,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$M_{z,Rd}$ [kNm]	12,348	35,485	11,259	-
$\eta$ [-]	<b>0,799</b>	<b>0,652</b>	<b>0,328</b>	<b>0,225</b>

\* Tím je míněno přímé lanko napnuté na 1 kN mezi K.S.

Tabulky 17-19 ukazují, že využití všech průřezů je menší nebo cca rovno než **1,0**. Překročení celkového využití krajního kotveného sloupku o 2,8% v případě sklonu 1:4, se dá uvažovat bezpečné, vzhledem k aplikaci součinitelů zatížení a materiálu. Navržené průřezy tedy vyhovují i na skloněných lankových zábradlích. Stojí za to si povšimnout, že normálová síla v krajních sloupcích se zvětšujícím sklonem roste, zatímco ohybové momenty klesají. Obecně však platí, že čím větší je sklon zábradlí, tím méně jsou sloupky využity. Příklad modelu zábradlí ve sklonu s vykresleným využitím je vidět na Obr. 163.



Obr. 163 Model lankového zábradlí ve sklonu 1:1 s vykresleným využitím

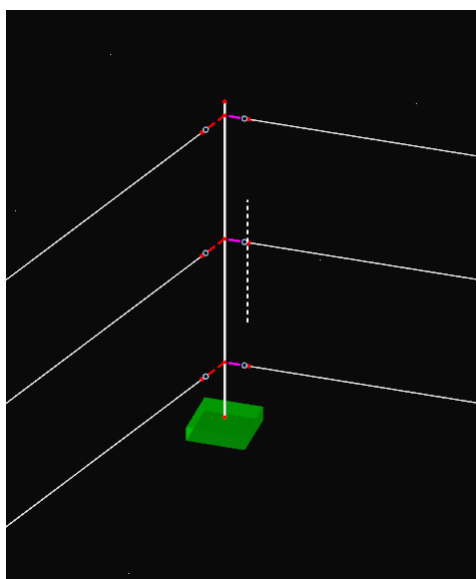
### 3.4.5. Sestavy zábradlí

Sestavou je myšleno spojení vodorovných a skloněných přímých částí do jednoho zábradlí. Takové se umísťuje například na šikmé nebo kolmé mostní křídla, viz např. Obr. 164. Bylo vytvořeno šest modelů sestav s rozdílnou geometrií rozložení sloupků. Zde budou představeny tři. Všechny mají délku vodorovné části **8 m** a šikmé části **6 m**. Rozdíl je v půdorysném úhlu, který svírají vodorovná s šikmou částí zábradlí; tedy **180°**, **135°** a **90°**. Důvodem vytváření těchto modelů je především zkoumání namáhání sloupku v místě zlomu, dále „hraniční“ sloupek. V případě, že tento úhel je menší než 180°, je tento sloupek namáhán ohybovým momentem ve dvou směrech. Modely byly zatíženy stejným způsobem jako v předchozích kapitolách, tedy viz kap. 3.2.



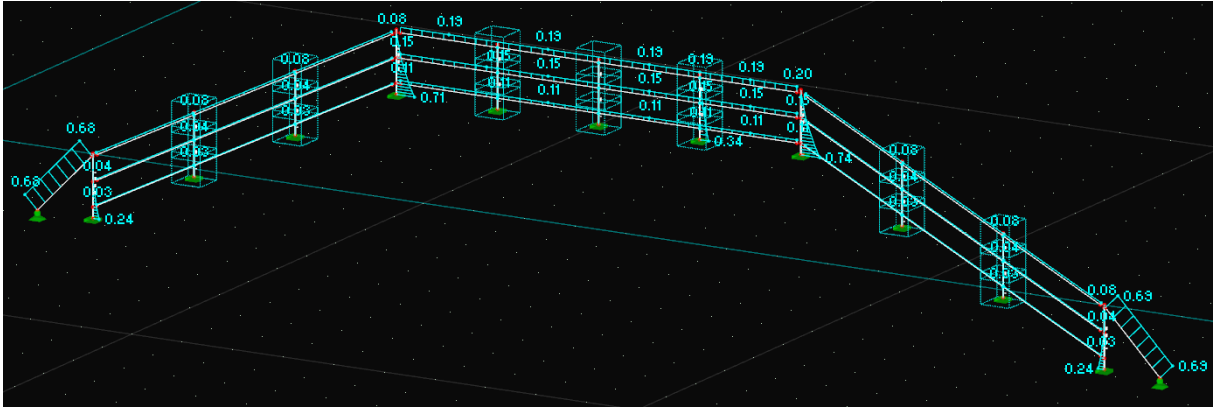
Obr. 164 Příklad mostu s možným použitím zábradelní sestavy

Z důvodů popsaných v kap. 3.1.5 nefiguruje v tomto návrhu lanko, které mění směr. Opět je předpokládáno, že lanka jsou na „hraniční“ sloupek přikotvena pomocí ocelových ok a lanových svorek, jak je popsáno v kap. 3.1.2. Nikoliv, že by jimi procházela volně. V programu RFEM 5 je tedy opět využito příkazu Tuhá vazba kloub-vetknutí nebo vetknutí-kloub (Obr. 165). Průřezy sloupků se uvažují podle délky přímé části a tabulek v kap. 3.4.1 až 3.4.4.

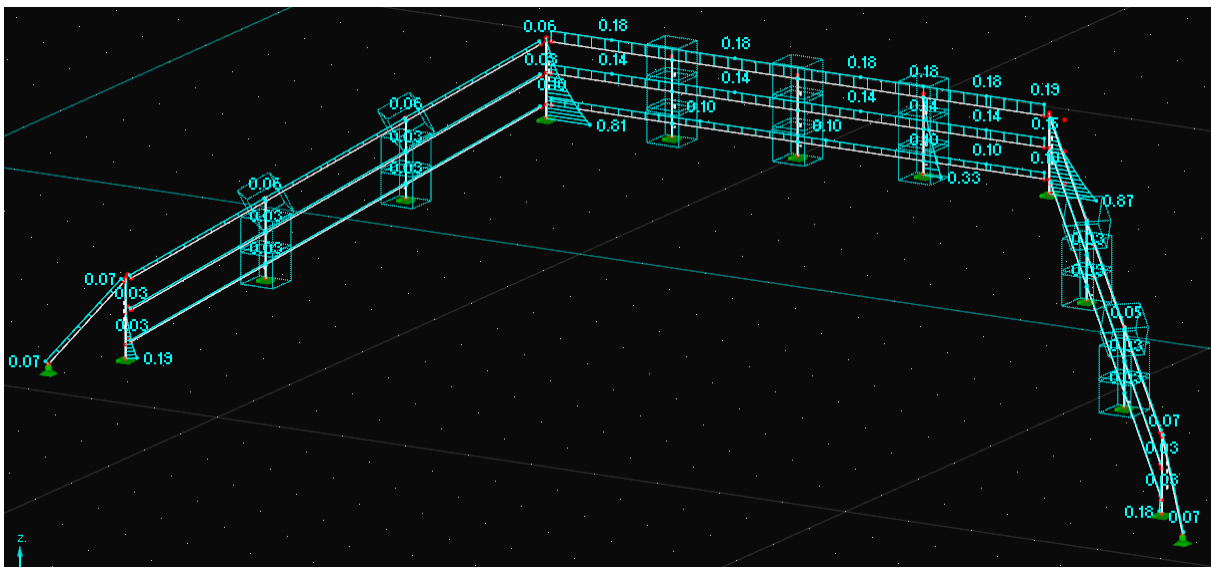


Obr. 165 „Hraniční“ sloupek jako prut s tuhými vazbami v programu RFEM 5

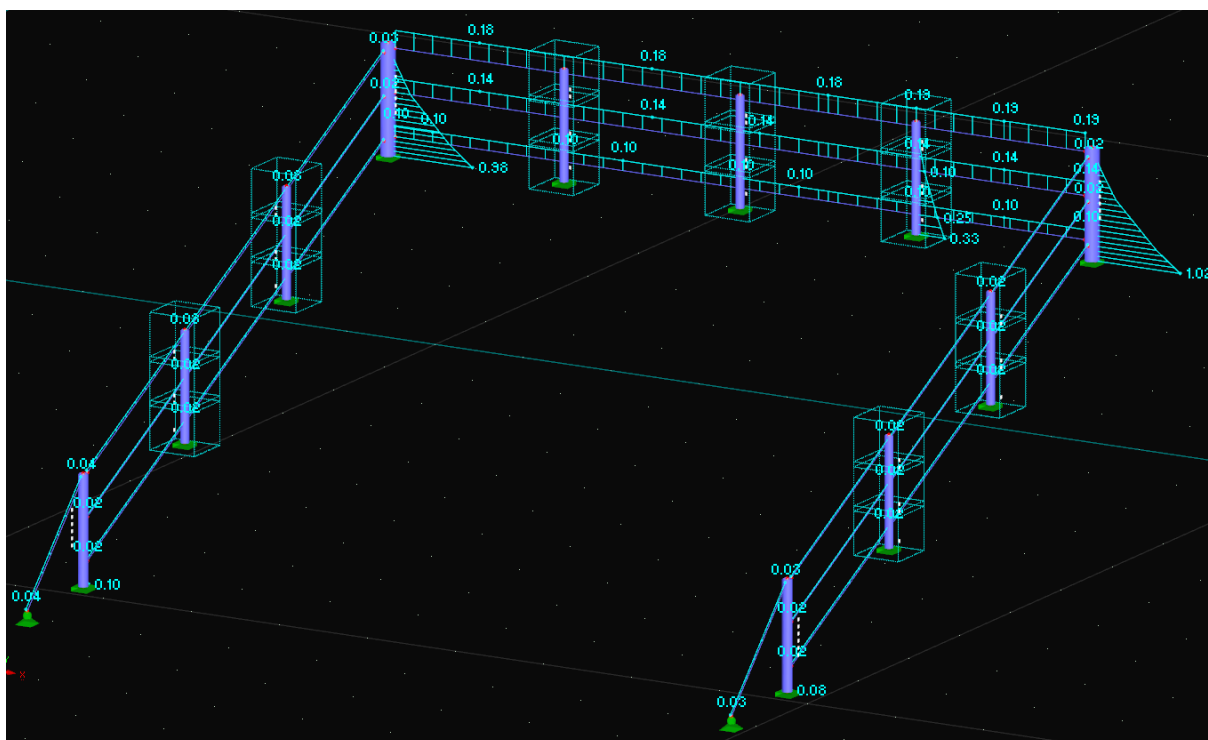
Z výsledků modelů vyplývá, že v případě, že se pro „hraniční“ sloupky použijí stejné dimenze jako pro nekotvené krajní sloupky u vodorovných modelů (4, 6, 8, 10 m), vychází jejich využitelnost od hodnoty **0,75** až po cca **1,0**. Platí, že čím menší úhel odklonu šikmé části od vodorovné, tím jejich využití roste.



Obr. 167 Sestava zábradlí s úhlem změny směru 180°



Obr. 166 Sestava zábradlí s úhlem změny směru 135°



Obr. 168 Sestava zábradlí s úhlem změny směru 90°

Z důvodů, že kombinací prostorových uspořádání různých sestav je mnoho, není v rámci této práce vypracována tabelizace pro dimenze „hraničních“ sloupků. Návrh a posouzení byl proveden pouze v programu RFEM 5 graficky pomocí přídatného modulu RF-STEEL Members. A to pouze v případě šesti různých sestav, ze kterých tři jsou ukázány na obrázcích výše.

Závěr je takový, že když se dimenze průřezů „hraničních“ sloupků zvolí ze sloupečků „N.K.S.“ z Tabulka 21 a Tabulka 23 podle délky vodorovné části sestavy (tj. 4, 6, 8, 10 m), zábradlí vyhoví na zatížení z kap. 3.2.

#### 3.4.6. Návrh kotvení lanka

V programu společnosti Hilti s.r.o. Profis Anchor bylo navrženo kotvení šikmých kotvicích lanek. Tahové síly, které v nich působí během nejhoršího zatěžovacího stavu, jsou pro všechny délky modelů vypsány v následující tabulce:

Tabulka 20 Extrémní tahové síly v kotvicím lanku

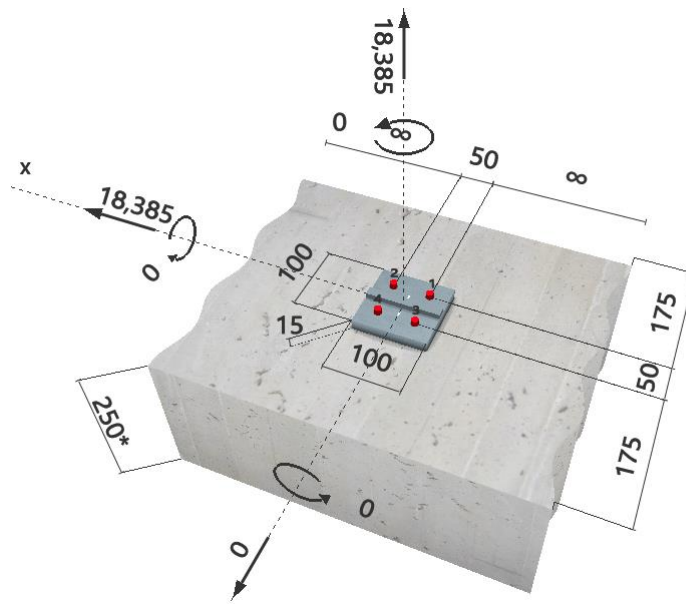
Délka zábradlí [m]	4	6	8	10
Tahová síla v kotvicím lanku [kN]	26,0	26,0	25,0	25,0

Protože jsou tyto síly téměř stejné, je proveden pouze jeden návrh; a to na sílu **26,0 kN**. Na toto zatížení bylo navrženo kotvení **čtyřmi** chemickými kotvami typu **HVZ M10x75** s kotevní deskou o rozměrech **100 x 100 x 15 mm**. Místo svislého kotevního plechu



s otvorem, který je popsán v kap. 3.1.3, je použit plechový pásek tloušťky **12 mm**. Ten je zatížen silou **26 kN** pod úhlem **45°**.

Tento návrh vyhoví s využitím **95%**. Podrobnosti návrhu, výpočtu, posouzení a geometrie kotvení je k prohlédnutí v Příloze 2, tj. protokol z programu Profis Anchor.



Obr. 169 Kotva kotvícího lanka – z programu Profis Anchor

### 3.4.7. Shrnutí a alternativní návrh

V předchozích kapitolách 3.4.1 až 3.4.4 byly navrženy a posouzeny dimenze použitých prvků u konkrétních variant modelů zábradlí. V následující tabulce je představen celkový přehled těchto návrhů:

Tabulka 21 Přehled dimenzí sloupků pro různé délky zábradlí

L [m]	Ø K.S.		Ø S.S.	Ø Lanka [mm]
	K.K.S.	N.K.S.		
4	102/10	159/8	89/8	8,0
6	102/8	159/8	89/8	8,0
8	102/8	152/8	89/8	8,0
10	102/6,3	152/8	89/8	8,0

(K.K.S. – kotvený krajní sloupek, N.K.S. – nekotvený krajní sloupek, S.S. – středový sloupek)

### Alternativní návrh

Alternativní návrh je proveden v důsledku toho, že dimenze sloupků navrhnuté na zatížení z kap. 3.2 jsou příliš mohutné. Vzhledem k tomu, že jedna z výhod a důvodů použití lankového zábradlí na mostech je jeho subtilnost a nenápadnost, tak např. profil **Ø159/8** by působil velice nápadně a co se týče subtilnosti, kontraproduktivně.

Původní návrh dimenzí byl naladěn na dominantní zatížení pádem osoby, jehož hodnoty byly zadány dle výsledků experimentu. Pro alternativní návrh byly tyto hodnoty redukovány, a to dle hodnot uvedených v plánovaném MVL 720. K dokončení tohoto vzorového listu přispěly i data z experimentu, provedeného v rámci této práce.

Tabulka charakteristických hodnot zatížení zábradlí z plánovaného MVL je vidět dále.

Tabulka 22 Charakteristické hodnoty zatížení zábradlí proměnným zatížením dopravou

model zatížení		P <sub>I</sub>		P <sub>II</sub>		P <sub>III</sub>		P <sub>IV</sub>		P <sub>V</sub>	současné působení vodorovného a svislého zatížení	
směr působení		vodorovné příčné (v obou směrech)				svislé (jen dolů)				vod. příčné		
konstrukční prvek zábradlí		madlo	příče	madlo	příče	madlo	příče	madlo	příče	výplň		
zatížení		Q <sub>H,k</sub>	Q <sub>Hi,k</sub>	Q <sub>H,k</sub>	Q <sub>Hi,k</sub>	Q <sub>V,k</sub>	Q <sub>Vi,k</sub>	Q <sub>V,k</sub>	Q <sub>Vi,k</sub>	Q <sub>HP,k</sub>		
kategorie zábradlí	stručný popis	[kN/m]		[kN]		[kN/m]		[kN]		[kN]		
Typ 1	bezpečnostní	služební chodníky	± 0,8	± 0,8	± 1,0	± 0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	± 0,8	ne
Typ 2		revizní chodníky	± 0,8	-	± 1,0	± 0,8	0,8	-	1,0	0,8	± 0,8	
Typ 3		svahová křídla a čela	-	-	± 2,0	± 0,8	-	-	1,0	0,8	± 0,8	
Typ 4	ochranné	veřejný chodník	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	± 1,0	ano
Typ 5		nástupiště	± 1,0* až ± 5,0	± 1,0	± 2,0	± 1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	± 1,0	

Síly z kap. 3.2.3.1 byly tedy nahrazeny svislými silami o hodnotách:

$$F_{Ed,1,v} = 1,0 \text{ kN},$$

$$F_{Ed,2,v} = 0,8 \text{ kN},$$

$$F_{Ed,3,v} = 0,8 \text{ kN},$$

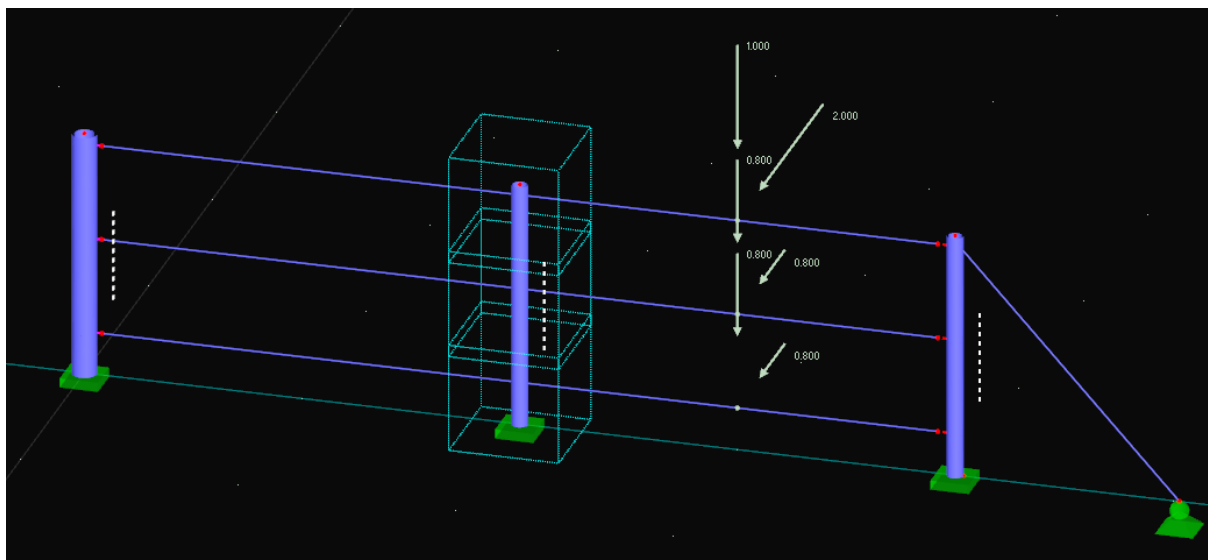
a vodorovnými silami o hodnotách:

$$F_{Ed,1,h} = 2,0 \text{ kN},$$

$$F_{Ed,2,h} = 0,8 \text{ kN},$$

$$F_{Ed,3,h} = 0,8 \text{ kN},$$

viz nadcházející obrázek.



Obr. 170 Alternativní hodnoty mimořádného zatížení

Po výpočtu bylo zřejmé, že i nadále zůstává pád osob dominantním zatížením. Průběh návrhu a posouzení se nadále shoduje s kap. 3.4.1 až 3.4.4, ale z důvodu zbytečného opakování postupu, zde bude uvedena pouze tabulka s přehledem nových dimenzí sloupků, viz Tabulka 23.

Tabulka 23 Přehled redukovanych dimenzí sloupků pro různé délky zábradlí

L [m]	Ø K.S.		Ø S.S.	Ø Lanka [mm]
	K.K.S.	N.K.S.		
4	76/8	114/12,5	76/5	8,0
6	76/6,3	114/12,5	76/5	8,0
8	76/6,3	114/10	76/5	8,0
10	76/5	114/10	76/5	8,0

Autor doufá, že dimenze uvedené v této tabulce budou na skutečných konstrukcích více použitelné, než ty z původního návrhu.

## **4. Závěr**

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou chování lankových zábradlí pro železniční mosty a vytvoření přehledných tabulek dimenzí sloupků pro jednoduché použití projektanty.

V rámci práce byl proveden experiment na zkušební přípravku zábradlí, kde byly měřeny převážně hodnoty napětí ve sloupcích a síla v horním napnutém lanku. Z výsledků experimentu bylo dále zvoleno teoretické zatížení a byly jím zatíženy modely zábradlí. Tvorba modelů, jejich zatěžování a následné návrhy prvků zábradlí, je další částí této práce. Modely byly vytvořeny ve výpočtovém softwaru DLUBAL RFEM 5 a tabulkově posouzeny.

Autor věří, že výsledné navržené dimenze, uvedené v přehledných tabulkách, mohou být použity pro návrh skutečného zábradlí na mostech či římsách. Případně mohou být využity pouze jako odrazový kámen pro finální návrh projektantem.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY, ZDROJŮ A ODKAZŮ**

- [1] ČSN 74 3305 Ochranná zábradlí
- [2] Dlubal Software s.r.o.: RFEM 5, manuál k programu, 2012
- [3] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb
- [4] ČSN EN 1991-1-5 (73 0035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou
- [5] <http://www.metal-trade.cz/cs/eshop/item/napinak-vysokopevnostni-americky-typ>
- [6] ČSN EN 12385-4 +A1 (024302): Ocelová drátěná lana - Bezpečnost - Část 4: Pramenná lana pro všeobecné zdvihací účely
- [7] <https://www.hilti.cz/kotevn%C3%AD-technika/chemick%C3%A9-patrony/r1221>
- [8] <http://www.konstrukce.cz/clanek/chemicka-kotva-funguje-v-jakemkoliv-stavebnim-materialu/>
- [9] Hilti ČR spol. s r.o.: PROFIS ANCHOR, PC software
- [10] Dunne, F., Petrinic, N. Introduction to Computational Plasticity, Oxford University Press, 2005.
- [11] Khan, A.S., Huang, S., Continuum Theory of Plasticity, Wiley & Sons, 1995.
- [12] Bathe, K.J. Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.
- [13] Belytschko, T. et al. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley & Sons, 2001.
- [14] C. T. Kelley, *Solving Nonlinear Equations with Newton's Method*, no 1 in Fundamentals of Algorithms, SIAM, 2003. ISBN 0-89871-546-6
- [15] <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~limpouch/numet/nr/node15.html>
- [16] SCIA CZ, s.r.o.: SCIA Engineer v 16.1, 2016
- [17] ČSN EN 1990 ed. 2 (730002): Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- [18] <http://www.galenus.cz/clanky/biochemie/biochemie-fyziologie-slozeni-tela>
- [19] ČSN EN 1993-2 Navrhování ocelových konstrukcí - ocelové mosty
- [20] ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů
- [21] ČSN EN 1993-1-4 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-4: Obecná pravidla - Doplňující pravidla pro korozivzdorné oceli
- [22] ČSN EN 1991-2 ed. 2 (73 6203) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou

**PŘÍLOHA 1**Použité symboly:

A..... plocha průřezu

 $W_{pl}$ ..... plastický průřezový modul $\eta$ ..... celkové využití průřezu $N_{Ed}$ ..... návrhová normálová síla $M_{y,Ed}$ ..... návrhový ohybový moment kolem osy Y $M_{z,Ed}$ ..... návrhový ohybový moment kolem osy Z $N_{Rd}$ ..... návrhová únosnost v tahu/tlaku $M_{y,Rd}$ ..... návrhová únosnost pro ohybový moment kolem osy Y $M_{z,Rd}$ ..... návrhová únosnost pro ohybový moment kolem osy Z $f_y$ ..... mez kluzu oceli sloupků $f_{y,l}$ ..... mez pevnosti lanek $\gamma_{M1}$ ..... součinitel spolehlivost materiálu oceliPosouzení průřezu sloupku:

$$N_{Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} [kN]$$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M1}} [kNm]$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M1}} [kNm]$$

$$\eta = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} [-]$$

Posouzení průřezu lanek:

$$N_{Rd} = \frac{A \times f_{y,l}}{\gamma_{M1}} [kN]$$

$$\eta = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} [-]$$