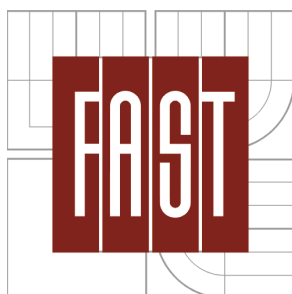


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA ZVONOVÉ STOLICE S VYUŽITÍM MODERNÍCH GEODETICKÝCH METOD

STATIC ANALYSIS OF BELL STOOL USING MODERN GEODETIC METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

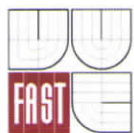
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTINA MOJROVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ALEŠ NEVAŘIL, PH.D

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martina Mojrová
Název	Statická analýza zvonové stolice s využitím moderních geodetických metod
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014


prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu


prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Datový soubor s body z laserového skenování zvonu a stolice

ČSN EN 1995 Navrhování dřevěných konstrukcí

ČSN EN 1991 Zatížení konstrukcí

John, F., Krňávek, P., Pátek, A.: Zábřežské zvony, 59 str., 2008, ISBN 978-80-254-3452-9

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Cílem práce je vytvořit z datového souboru bodů z laserscaneru, tzv. mraku bodů, objektový model.

Na základě tohoto modelu vytvořit statický model jako prostorovou prutovou soustavu a dále MKP model v prostředí SW ANSYS. Studentka provede statickou analýzu dřevěné konstrukce stolice dle pravidel ČSN EN 1995 Navrhování dřevěných konstrukcí.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

3.



Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Cílem práce je vytvoření a posouzení statického modelu konstrukce zvonové stoličky pomocí nových geodetických metod. Tím se rozumí zpracování dat z lasersceneru, tzv. mračna bodů na geometrický model, jež je možné importovat do různých rýsovacích a modelových programů. Dále z tohoto geometrického modelu vytvořit statický model, v programu ANSYS pak MKP model a vypočet vnitřních sil. Nakonec posouzení konstrukce dle ČSN EN 1995-1 Navrhování dřevěných konstrukcí.

Abstract

The aim is to create a static model assessment of construction bell stools using new geodetic methods. This means data processing from laser scanner called. Point Cloud to the geometric model, which can be imported into a variety of drawing and modeling programs. Furthermore, use this geometrical model to create a static model, in program ANSYS FEM model and then calculate the internal forces. Finally, assessment of structures according to EN 1995-1 Design of timber structures.

Klíčová slova

Mračno bodů, geometrický model, statický model, laserscanner, zvonová stolička.

Key words

Point cloud, geometry model, static model, laserscanner, bell stool.

Bibliografická citace díla

Martina Mojrová *Statická analýza zvonové stolice s využitím moderních geodetických metod*. Brno, 2015. 45 s., 11 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Nevařilovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Ondřeji Krňávkovi, Ing. Tomáši Volaříkovi a Ing. Petru Královi za poskytnutí cenných rad a poznatků při práci v různých výpočetních programech.

Obsah

Úvod.....	1
1 Historie Zábřežské zvonice.....	2
2 Laserscanery	3
2.1 Laserscanery obecně	3
2.2 Použitý skener a jeho nastavení	4
2.3 Zásady skenování	5
3 Zpracování mračna bodů	7
3.1 Zpracování dat v programu SCENE	7
3.2 Zpracování dat v programu Geomagic design	9
3.3 Zpracování dat v programu AutoCAD a Rhinoceros 3D.....	13
4 MKP model a výpočet vnitřních sil	16
4.1 Preprocesor.....	16
4.2 Solvers (řešiče) a postprocesor.....	19
5 Posouzení	24
5.1 Vstupní údaje	25
5.2 Příklad posouzení prutu namáhaného tahem.....	25
5.3 Příklad posouzení prutu namáhaného tlakem	26
5.4 Příklad posouzení prutu namáhaného kombinací ohybu a tahu.....	27
5.5 Příklad posouzení prutu namáhaného kombinací ohybu a tlaku.....	28
5.6 Příklad posouzení prutu namáhaného smykem.....	31
Závěr	33
6 Bibliografie	34
Seznam obrázků.....	35
Seznam tabulek.....	36
Seznam příloh	37
Přílohy.....	I

Úvod

3D laserové skenování je velice přesnou, rychlou a bezpečnou bezkontaktní metodou zaměření skutečného stavu složitých technologických celků. Cílem je vytvořit virtuální model reálného objektu s minimální ztrátou informace o jeho rozměrech a tvaru.

Laserscener lze použít v mnoha odvětvích, např. pro zaměřování průmyslových hal, výrobních linek, potrubních systémů nebo průmyslových výrobků, které je možné následně vyrobit, či pro měření deformací karoserií vozidel po dopravních nehodách. Pro pořizování prostorových geografických dat nejen na zemi je používáno laserové skenování povrchu. Laserové skenování lze využít i v kriminalistice pro detailní nasnímání místa činu.

Cílem této bakalářské práce je zjistit možné použití moderní geodetické metody zaměřování pomocí lasersceneru pro účely stavební mechaniky. Pro tento účel byla vybrána již naskenovaná konstrukce zvonové stolice kostela sv. Bartoloměje v Zábřeze. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část se zabývá zpracováním výstupu z datového souboru z lasersceneru, tedy mračna bodů tak, aby výsledkem byl geometrický objektový model konstrukce s jasně danými a zjistitelnými parametry ve formátu „.iges“ a následného vytvoření statického modelu. Druhá část pak popisuje vytvoření MKP modelu a výpočet vnitřních sil této konstrukce pomocí programu ANSYS a posouzení konstrukce dle pravidel ČSN EN 1995 Navrhování dřevěných konstrukcí.

1 Historie Zábřežské zvonice

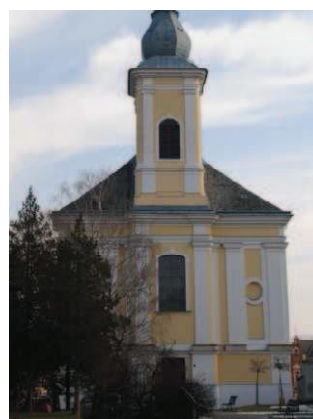
První zmínka o Zábřeze pochází z roku 1255. První zvon zazněl již brzy po založení města a to v polovině 13. století. Spolu s městem byl vystaven také kostel, který byl v roce 1351 farním. Sanktusová vížka na hřebeni střechy tohoto kostela umožňovala zavěšení jen menších zvonů. Větší zvony byly zavěšeny na náměstí, kde stávala samostatná zvonice. V průběhu 17. století se ve zdech a klenbě začaly objevovat trhliny a hrozilo, že se kostel zřítí. Původní gotický kostel svatého Bartoloměje byl tedy v polovině 18. století stržen a na jeho místě byl postaven od základu nový [1] [2] [3].

První bohoslužba v téměř dokončeném kostele proběhla v roce 1754. První opravy byly zapotřebí již v roce 1760, kdy se v klenbě kostela objevily trhliny. Z tohoto důvodu, byl v roce 1786 kostel stažen ocelovými ankry. O 7 let později během největšího požáru města shořela věž a velkým žárem se roztavily zvony. Nová bání nahradila provizorní stanovou střechu věže až po roce 1862. Během rekonstrukce střechy byla pořízena zvonová stolice a postupně byla osazena novými zvony [1] [2] [3].

Zvonový soubor zavěšený ve 47 metrů vysoké věži byl několikrát obnovován. Dalšími pohromami kromě požáru byly válečné rekvizice v letech 1916, 1917 a 1942. O obnově zvonového souboru se začalo uvažovat po změně politického režimu na počátku 90. let. V roce 1996 byla věž vyčištěna, byly nakonzervovány trámy ve zvonovém patře a restaurován zvon sv. Barbory. Na základě parametrů navržených zvonů bylo provedeno posouzení zvonové stolice z hlediska dynamického a statického namáhání. Výsledné hodnoty ukázali, že konstrukce na zvýšené zatížení a nový způsob namáhání vyhoví. Na základě výsledků této studie byly provedeny opravy zvonové stolice, vyměněn nahnílý nosný trám a doplněna jedna vzpěra. Od roku 2000 je zvonový soubor opět kompletní. Zvony znějí v akordu fis1 - a1 - h1 - cis2. Největším zvonom je městský zvon sv. Bartoloměje s nárazovým tónem fis1 a hmotností 1070 kg [2] [3] [4].



a)



b)

**Obr. 1: původní podoba kostela se sanktusovou vížkou (a) [4];
současná podoba kostela (b).**

2 Laserscanery

V následující kapitole jsou nejprve stručně popsány laserscanery spolu s použitým nastavením v případě zaměřování této konstrukce. Na základě zkušeností se zpracováním naměřených dat byly formulovány zásady, jež je vhodné dodržet při skenování konstrukcí, aby nedocházelo ke zbytečným zkreslením a tím i ke zkomplikování samotného zpracování.

2.1 Laserscanery obecně

Skenování věcí, konstrukcí i krajiny pomocí laserscanerů je v této době velmi oblíbenou metodou, jak získat jejich podrobné počítačové zobrazení. Skenerů je několik druhů, s různými dosahy a přesnostmi. Výstupem z nich je pak datový soubor, který může být v různých formátech. Na následujících obrázcích jsou různé používané typy skenerů, jež se od sebe velice liší, neboť každý je uzpůsoben na jiné typy skenovaných objektů.



Obr. 2: ukázky typů laserscanerů [5].

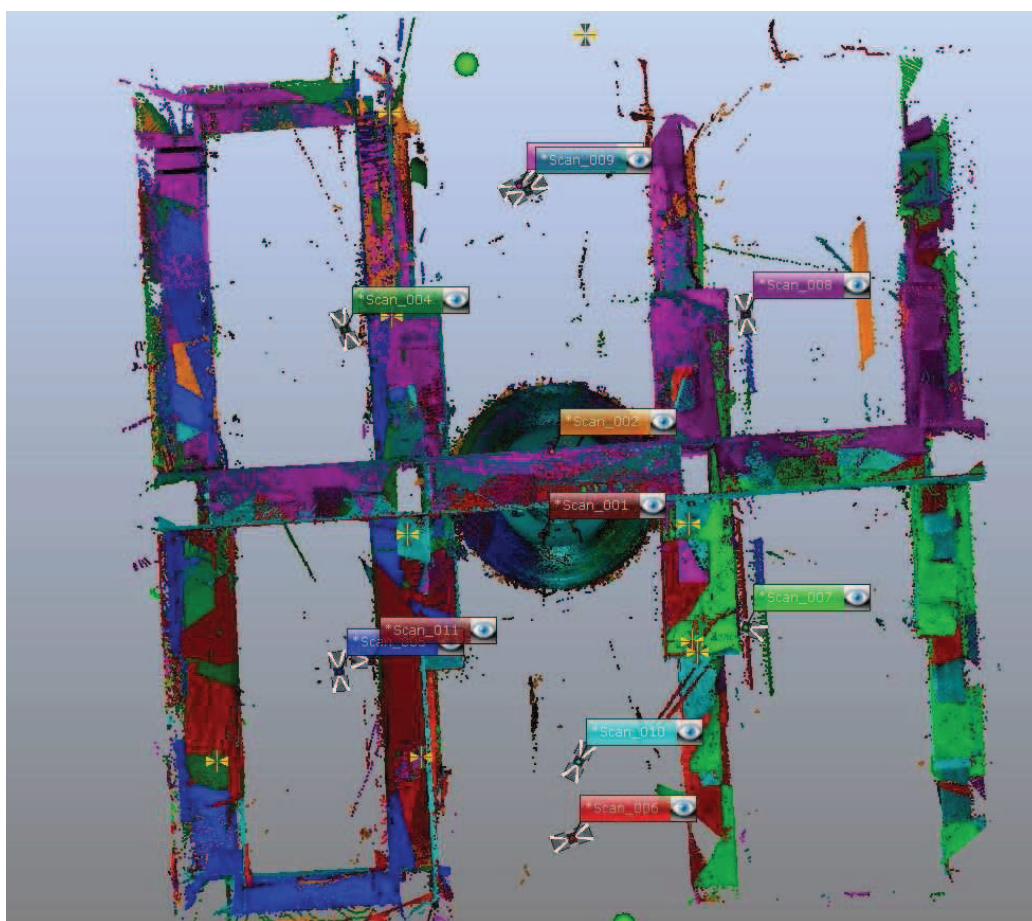
2.2 Použitý skener a jeho nastavení

V tomto případě byl použit skener FARO Focus 3D S 120. Použité nastavení skeneru je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1: nastavení laserscaneru.

Úhlový výsek	Vertikálně [°]	90 až -60
	Horizontálně [°]	0 až 360
Rozlišení [mm/10m]		6,136
Rychlost skenování [bod/s]		122

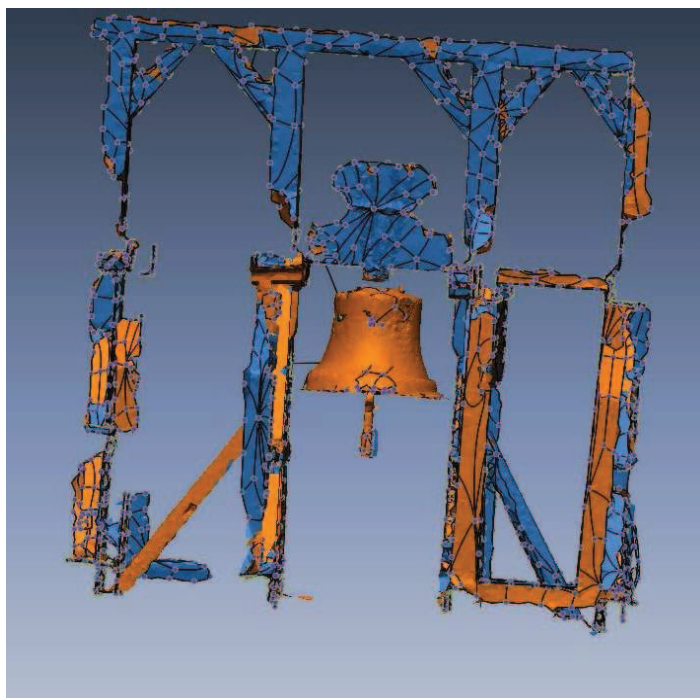
Aby byla konstrukce zachycená ze všech stran, je nutné provádět skenování z několika různých míst. Rozmístění skenerů v případě tohoto skenování je znázorněno na Obr. 3.



Obr. 3: rozmístění skenerů - pohled shora.

2.3 Zásady skenování

Během zpracovávání mračna bodů byly zjištěny určité chyby, jež vznikly při skenování. Jeden z největších nedostatků tohoto skenování byl ten, že primárně byl skenován zvon Bartoloměj a ne zvonová stolice, tím pádem nebyla konstrukce naskenovaná ze všech potřebných stran, viz Obr. 4.



Obr. 4: neúplně naskenovaná konstrukce.

Dalším negativním vlivem byla přítomnost nežádoucích předmětů a osob, jež zakrývaly konstrukci. Je proto vhodné co nejvíce těchto předmětů před skenováním odstranit a minimalizovat počet lidí a jejich pohyb ve skenovaném prostoru. Příklad nežádoucího objektu umístěného na konstrukci je uveden na Obr. 5.



Obr. 5: příklad nežádoucího předmětu.

Posledním důležitým aspektem je odhadnutí správného nastavení kroku skeneru, neboť při použití malého kroku je výstupní datový soubor zbytečně velký. Naopak pokud se skenuje menší složitý objekt, je vhodné zvolit menší krok, aby byl výsledek co nejpřesnější. Nastavení vhodného kroku by měl konzultovat skenující pracovník se zpracovatelem mračna bodů a zadavatelem projektu, díky čemuž by měla být práce velice efektivní.

Zásady skenování lze shrnout do následujících bodů:

- řádné promyšlení rozvržení skenovacích míst tak, aby byla konstrukce naskenovaná celá,
- odstranění nežádoucích a nepotřebných objektů ze skenované oblasti,
- správné nastavení kroku skeneru podle zamýšleného způsobu zpracování dat.

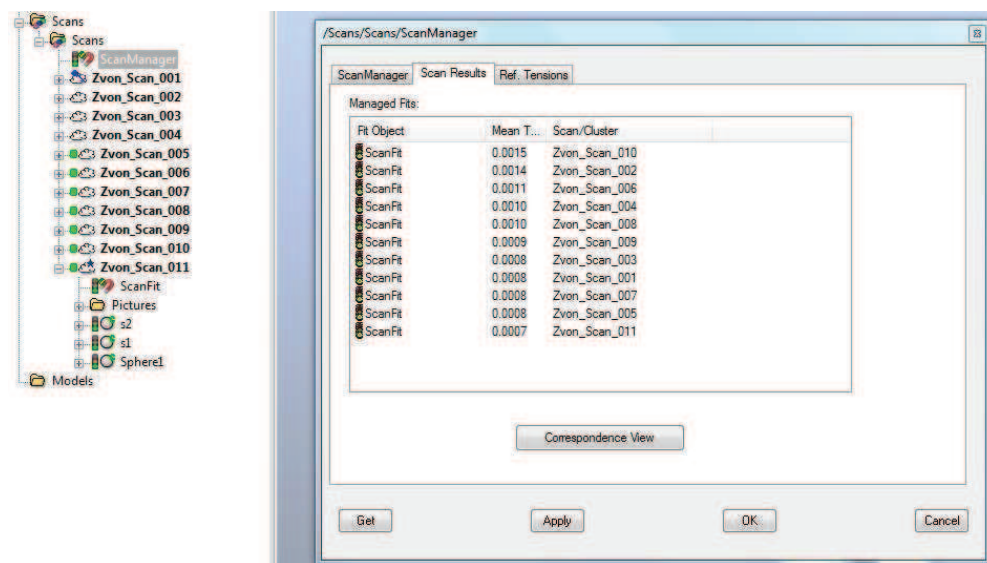
3 Zpracování mračna bodů

Tato kapitola je věnována popisu metodického postupu zpracování získaného mračna bodů pomocí programů SCENE, Geomagic Design, AutoCad a Rhinoceros 3D. Metodika byla vytvořena s ohledem na konečný výstup v podobě geometrického modelu, jež je základem pro analýzu konstrukce z hlediska stavební mechaniky.

3.1 Zpracování dat v programu SCENE

Po diskuzi s Ing. Tomášem Volaříkem byl jako první program pro zpracování zvolen program SCENE, který je vytvořený přímo pro potřeby uživatelů skenerů značky FARO [6].

Nejdříve byla do programu naimportována data ze všech skenování, tzn. jedenáct mračen bodů. Pomocí orientačních značek bylo provedeno sesouhlasení (fitování) jednotlivých skenů. Na Obr. 6 je v prostředním sloupci vidět odchylka fitování v metrech. Z hodnot je patrné, že fitování v programu SCENE je velice přesné. Průměrná odchylka je 1 mm, největší odchylka pak byla 1,5 mm. V levé části obrázku je strom jednotlivých skenů, s nimiž je možno pracovat dohromady i zvlášť. Obecně má na přesnost fitování vliv rozmístění orientačních značek a poté označování těchto značek přímo v programu.



Obr. 6: ScanFit.

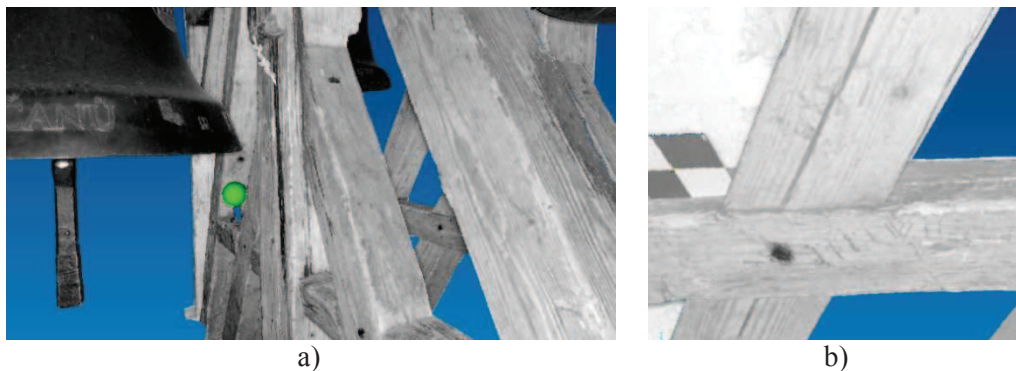
Protože sken zahrnoval kromě konstrukce zvonové stolice i její okolí bylo nutné odstranit nepotřebná data. Odstranění bylo provedeno z následujících důvodů:

- snazší orientace ve skenu a v konstrukci,
- snížení počtu bodů a tedy zmenšení velikosti výstupního souboru,
- odstranění nežádoucích objektů, které by následně způsobily zkreslení tvaru konstrukce (viz kapitola 2.3 Zásady skenování).

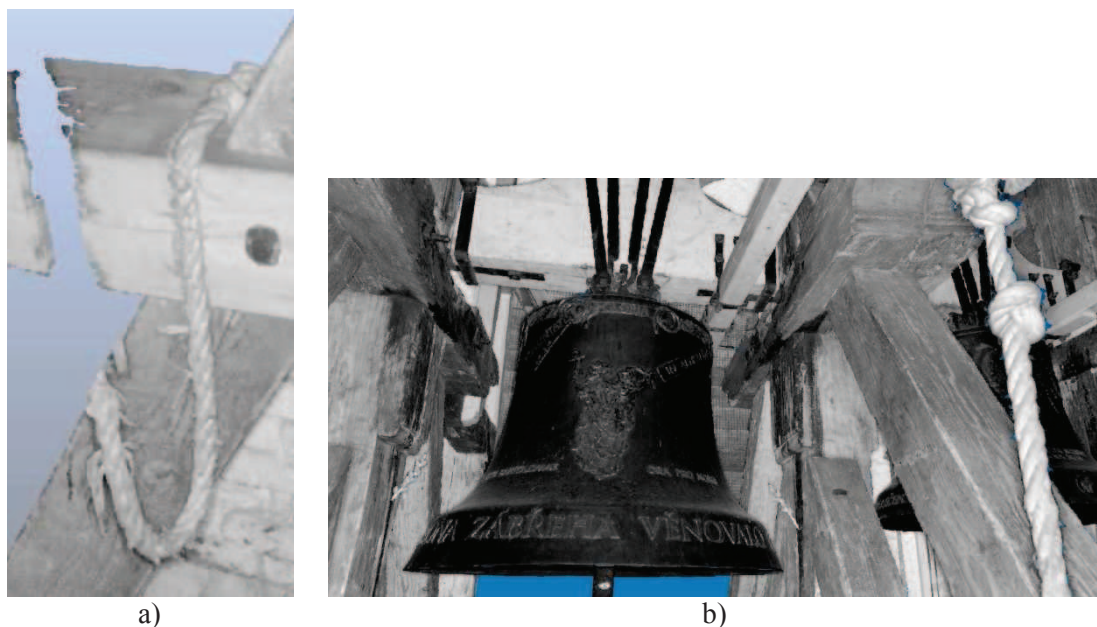
Promazávání probíhalo postupně v jednotlivých skenech. Na závěr bylo provedeno ještě konečné dočištění všech skenů dohromady. Na základě pozdějších zjištění bylo promazávání příliš podrobné, což vedlo k výraznému zvýšení časové náročnosti. Při práci v následujícím programu Geomagic design lze totiž okolní šum jednoduše redukovat a při získávání geometrie nechtěné části zanedbat.

Po dokončení výše uvedených úprav byla data exportována. Vzhledem k malému kroku skenování byla při exportu nastavena redukce dat na každý desátý bod. Tato redukce byla zvolena na základě porovnání exportů s různými redukcemi. Byl zvolen datový formát .pts, který je podporován mnoha programy zabývajícími se zpracováním mračen bodů.

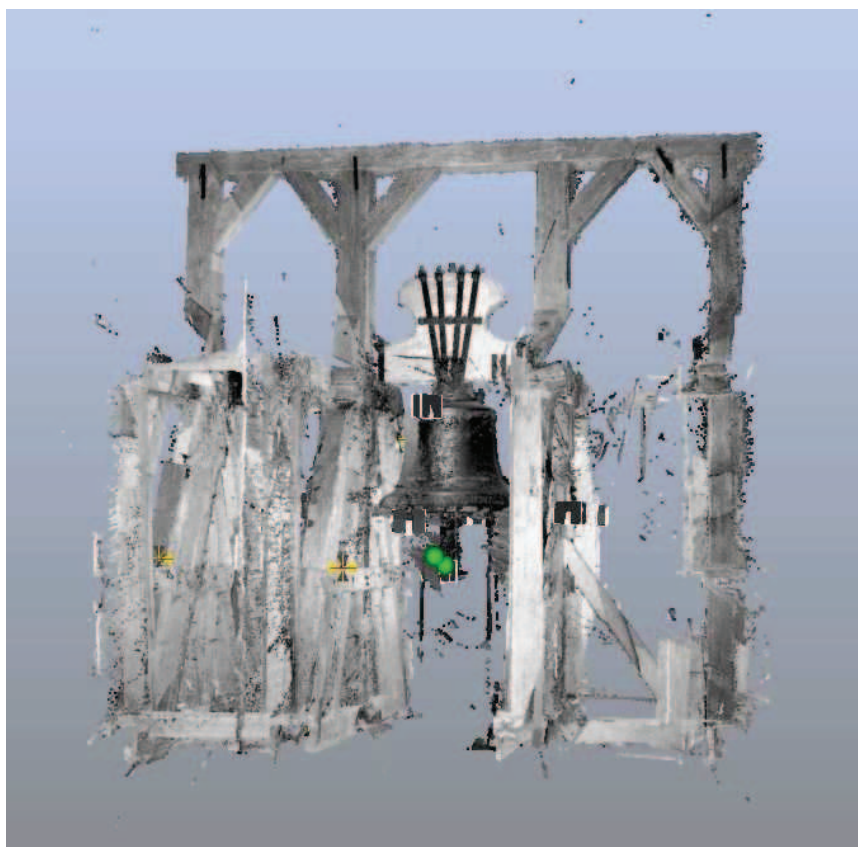
Na následujících obrázcích jsou uvedeny ukázky ze zpracování dat v programu SCENE.



Obr. 7: orientační značky pro fitování - koule (a) a terčík (b).



**Obr. 8: ukázka příliš podrobného smazání provazu (a);
ukázka částečně promazaného skenu (b).**



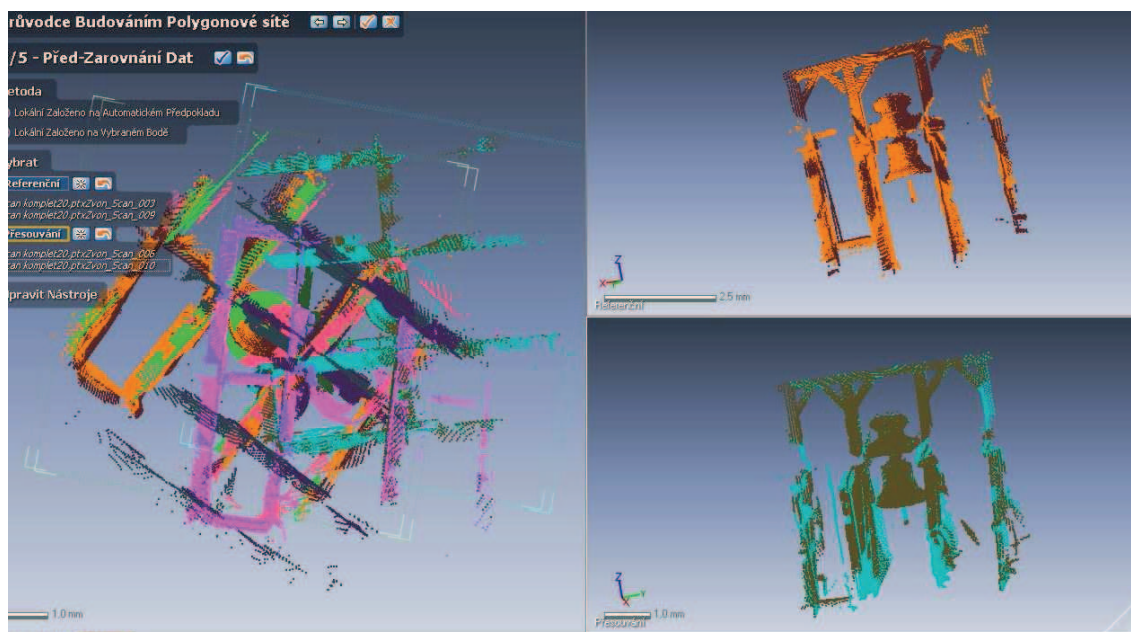
Obr. 9: zobrazení všech skenů najednou před promazáním okolního šumu.

3.2 Zpracování dat v programu Geomagic design

Po promazání skenů bylo třeba najít vhodný software, který umí zpracovávat mračna bodů a hlavně z něj tvořit objekty. Tato schopnost je uváděna u několika programů, bohužel většina z nich je schopná vytvořit pouze polygonovou síť (mesh), což není funkční editovatelný geometrický objekt (linie, plocha, objem), a tedy není možné jej použít jako geometrii statického modelu pro program Ansys apod.

Po několika neúspěších při práci s programy, které sice byly schopné vytvořit geometrii, ovšem způsoby jejího získávání byly značně neefektivní, případně velmi omezené, byl nalezen program Geomagic Design X (formálně Rapidform XOR) [7]. Ten díky svým funkcím umožňuje získávání geometrie z mračna bodů. Způsoby získávání jsou různé a záleží na uživateli a požadovaném výsledku, který způsob se použije.

Geomagic Design X je schopen dělat stejné úpravy jako předešlý program SCENE, ale SCENE umožňuje lepší zobrazení, kde se dají lépe rozpoznat jednotlivé konstrukce. Z hlediska fitování má program Geomagic Design X i funkci bestfit, která je mnohem přesnější. Větší význam má však pouze u malých objektů. Pro názornost je na Obr. 10 a Obr. 11 nastíněn princip bestfitování v tomto programu. V případě této práce však bylo využito již zarovnané konstrukce z programu SCENE.

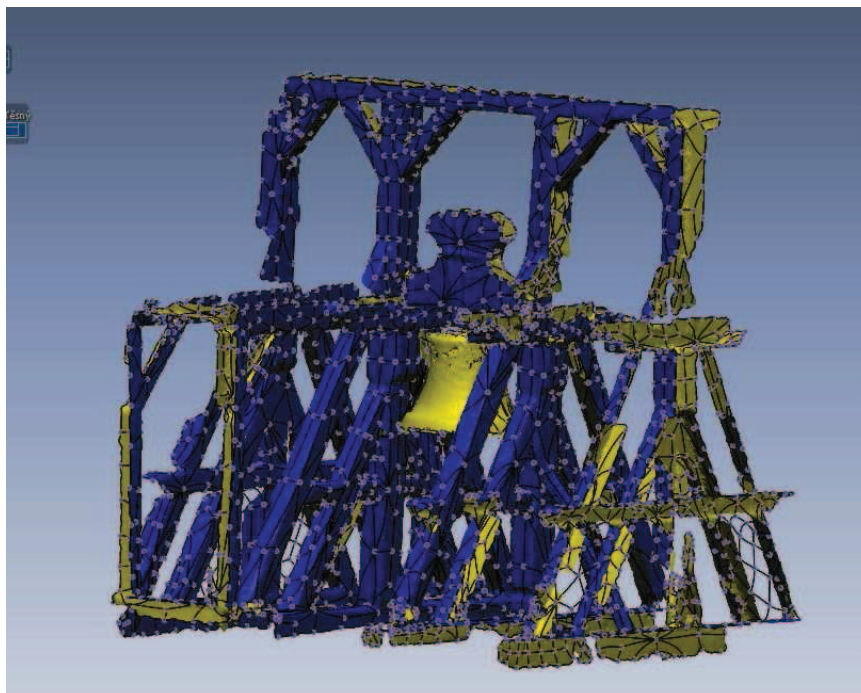


Obr. 10: předzarovnání pomocí orientačních bodů.



Obr. 11: zarovnaná konstrukce pomocí funkce bestfit.

Při práci v tomto programu byl nejdříve naimportován datový soubor již redukováného a zřítovaného mračna bodů. Následně byly použity funkce pro úpravu mračna tak, aby mohla vzniknout co nejdokonalejší polygonová síť jako základ pro modelování. Po odstranění tzv. šumu a jemném vyhlazení byla zkonstruována síť, jež je na Obr. 12. Jak je již uvedeno výše, je patrné, že konstrukce nebyla naskenována celá, a tudíž některé části chybí. I přes toto omezení bylo však možné vytvořit velice přesný model. Polygonovou síť je možné také editovat (např. vyhladit, zaplátovat vzniklé díry a nedostatky, ořezávat atd.).



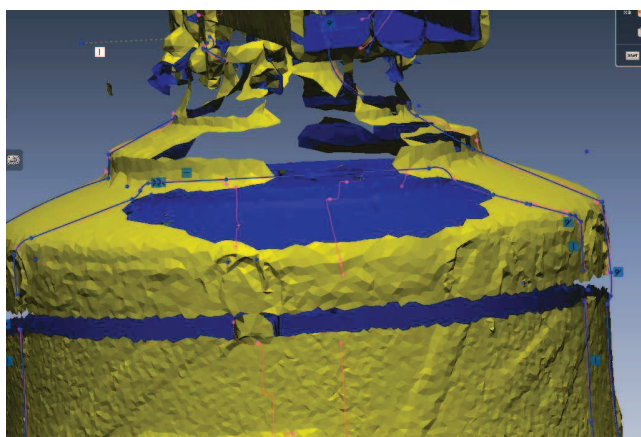
Obr. 12: vygenerovaná polygonová síť.

Způsobů modelování v programu Geomagic Design X je několik a záleží na tvaru konstrukce, požadavcích zadavatele a na skenovém podkladu, jaký postup bude využit.

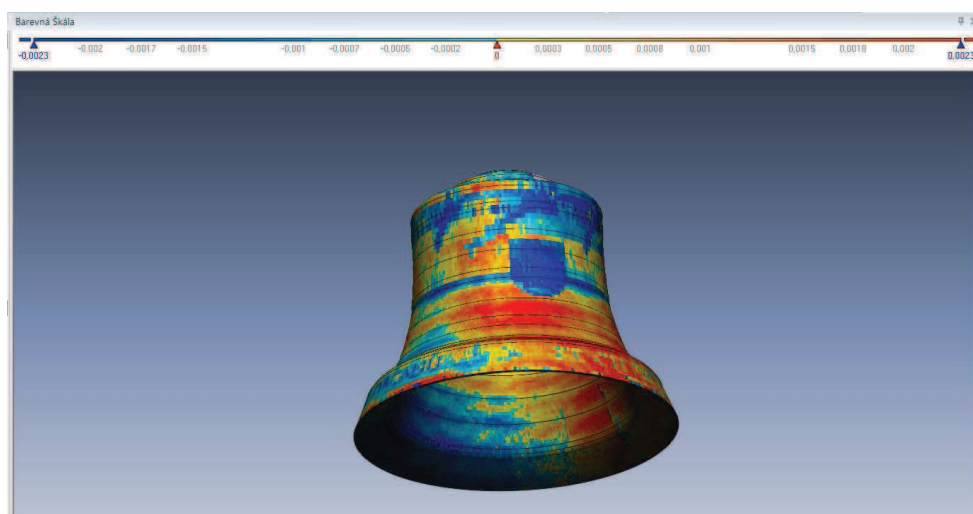
Jedním ze způsobů spočívá ve vytvoření základních obrysů linií, ploch a těles přímo z polygonové sítě pomocí funkce Mesh Skic a následně z nich pomocí klasických modelačních příkazů vytvořit plochy či tělesa. Ukázka tohoto postupu je vidět na Obr. 13 a na Obr. 14, kde bylo tímto způsobem vygenerováno tělo zvonu. Na Obr. 15 je již vygenerované těleso s vyobrazením barevné škály odchylky od polygonové sítě. V tomto případě je maximální odchylka 2,3 mm. Tato odchylka se vyskytuje převážně na místech, kde jsou na zvonu nápisy, či jiné reliéfy. Tento postup je časově i kvalitativně velice efektivní, vyžaduje však co nejpřesnější skenový podklad. Takto vniklý geometrický objekt již není třeba nijak upravovat a stačí jej pouze vyexportovat v příslušném formátu pro další využití.



Obr. 13: polygonová síť zvonu.

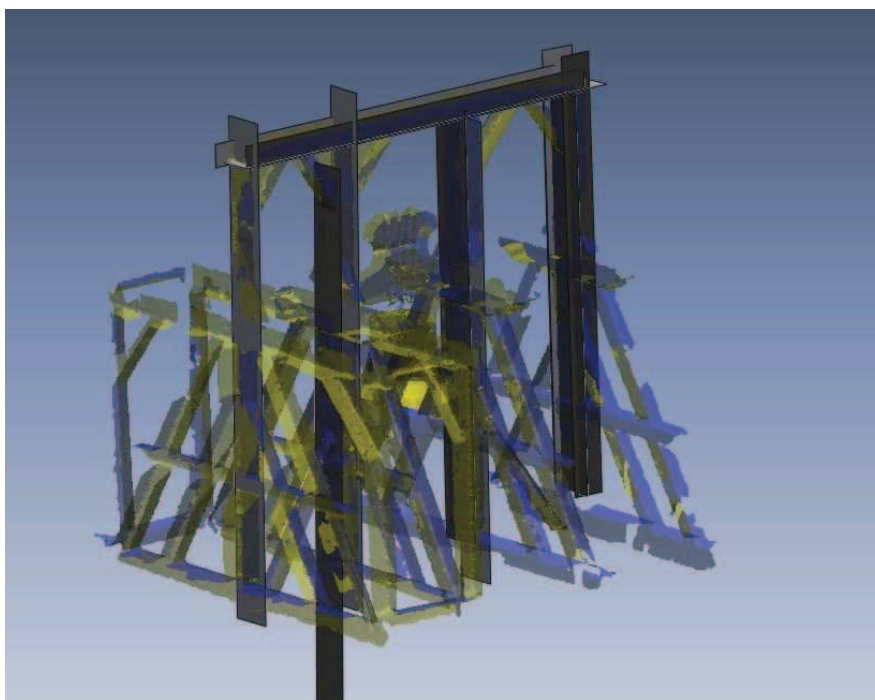


Obr. 14: tvoření a upravování mesh skech jako podkladu pro vytvoření tělesa.



Obr. 15: vygenerované těleso zvonu s barevnou škálou odchylek od polygonové sítě.

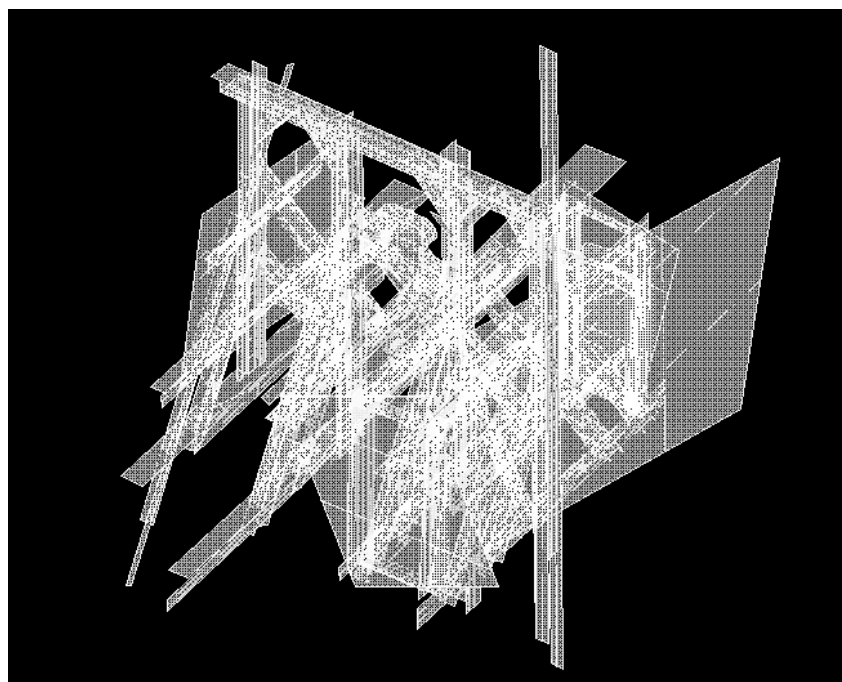
Způsob, který byl v práci použit, spočíval ve vybrání části polygonové sítě a proložení této části průměrnou plochou. Postup využívající funkci Mesh Skic by vzhledem k nedokonalé naskenované konstrukci nebyl možný, a proto byl i přes větší časovou náročnost zvolen tento postup. Dalším krokem bylo jednotlivé plochy navzájem ořezat tak, aby vznikl pouze model trémové konstrukce. V tomto programu je však tato úprava velice náročná, a proto byla vyexportována ve formátu .iges již tato hrubá verze geometrie, která byla následně upravena v dalších programech.



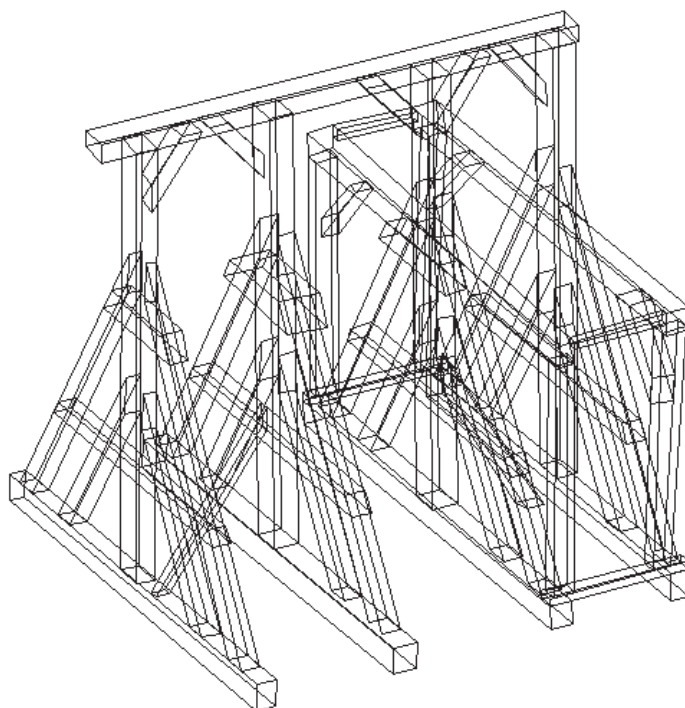
Obr. 16: ukázka prokládání ploch polygonovou sítí.

3.3 Zpracování dat v programu AutoCAD a Rhinoceros 3D

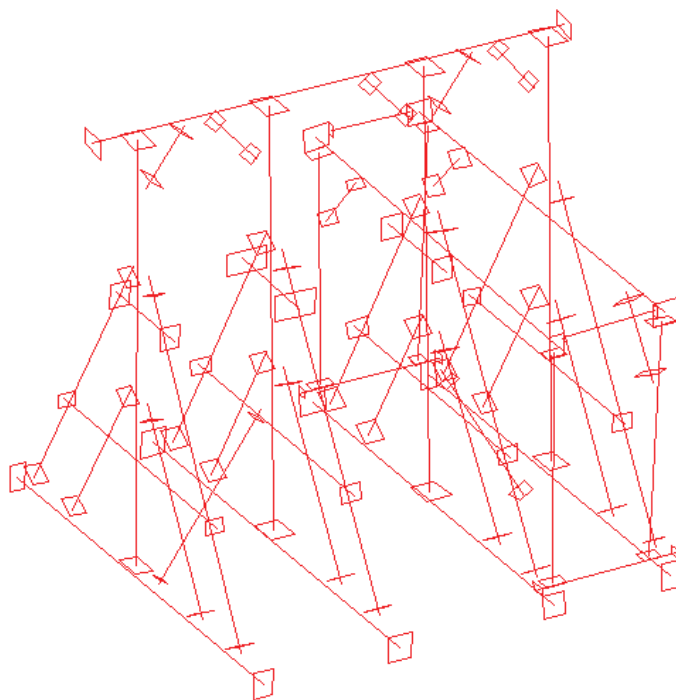
V programech AutoCAD a Rhinoceros 3D byl model konstrukce pouze upraven, a to konkrétně do 3D modelu tvořeného objemy, představující trámy konstrukce a na jednoduchý prutový statický model, který byl již výsledným požadovaným produktem. Byly použity oba softwary a to z důvodu, že každý umožňoval určité geometrické úpravy pro docílení optimálních výsledků. V programu AutoCAD byly též odměřeny jednotlivé dimenze trámů, které byly následně zadávány v programu Ansys. Následují ilustrační obrázky práce v programech AutoCAD a Rhinoceros 3D [8] [9].



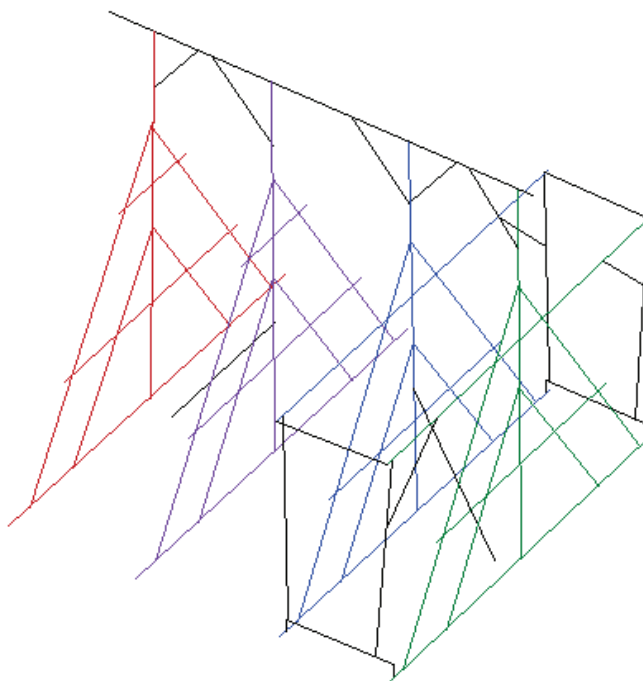
Obr. 17: importovaný geometrický model z programu Geomagic Design X před úpravou.



Obr. 18: 3D drátový model konstrukce.



Obr. 19: střednice jednotlivých trámů včetně označení jejich dimenzí.



Obr. 20: výsledný statický prutový model konstrukce.

4 MKP model a výpočet vnitřních sil

Tato kapitola se zabývá vytvořením MKP modelu konstrukce, zadáním vstupních hodnot pro výpočet a výpočtem vnitřních sil a přetvoření konstrukce v programu ANSYS Mechanical 15.0 [10].

Průběh analýzy v programu ANSYS lze rozdělit do následujících tří částí:

- Preprocesor, kde se zadávají veškeré vstupní hodnoty potřebné pro výpočet,
- Solvers (řešiče), kde se nastavuje způsob výpočtu,
- Postprocesor, část umožňující čtení a export výsledků.

4.1 Preprocesor

Preprocesor je část programu určená pro modelování a nastavení výpočtových parametrů. Protože geometrický model byl vytvořen v předchozích krocích, nebylo nutné jej vytvářet znovu a byl pouze naimportován. Bylo ovšem nutné vzít v potaz styčníky konstrukce a určit, zda se jedná o styčník tuhý či zda je prut připojen kloubově. Vzhledem k tomu, že se jedná o prutovou soustavu, byl zvolen konečný prvek Beam 188.

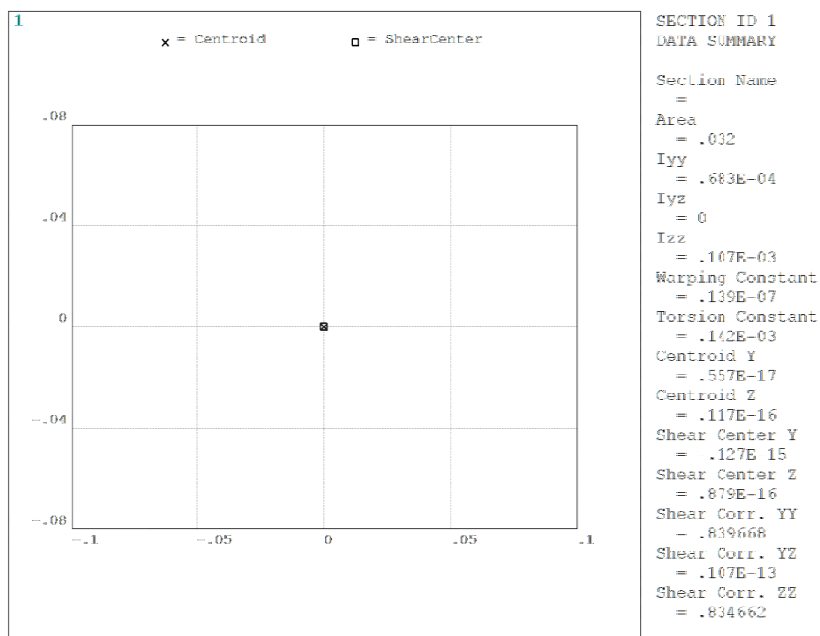
Následovalo zadání materiálových charakteristik. Jak bylo zjištěno v dostupných pramenech, materiál zvonových stolic je zpravidla dubové dřevo, které je pro konstrukci vhodné z důvodu pevnostních vlastností, vyšších hodnot modulu pružnosti v tahu i ve smyku a vyšší objemové hmotnosti. Na zvonovou stolic v Zábřeze však bylo použito měkké jehličnaté dřevo, ale pro zjištění konkrétních vlastností dřeva by bylo nutno provést laboratorní zkoušky. Vzhledem k zadání práce byly použity normové hodnoty z tabulek dle Eurokódu. Pro tento účel se běžně používá dřevo třídy C22, nicméně po uvážení veškerých negativních účinků na dřevo (vysychání, stárí, deformace atd.), byla zvolena třída dřeva C20. Hodnoty zadané do materiálových charakteristik jsou uvedeny v Tab. 2 [11].

Tab. 2: materiálové charakteristiky [12].

Hustota [kg/m^3]	$\rho=330$
Modul pružnosti [GPa]	$E_x=9,5$
	$E_y=0,32$
	$E_z=0,32$
Součinitel příčné kontrakce [-]	$\nu=0,1$
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	$G=0,59$

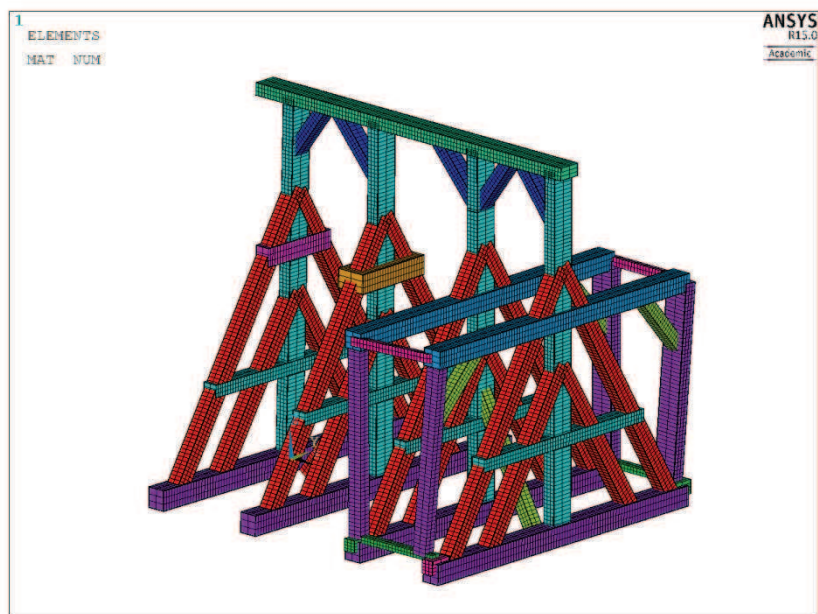
Pomocí příkazů „sections“ a „mesh attributes“ byly na základě odměřených vzdáleností v programu AutoCAD všem prutům nadefinovány rozměry. Kvůli náročnosti zadávání rozměrů bylo provedeno zjednodušení, kdy byly rozměry jednotlivých typů prutů nahrazeny jejich aritmetickým průměrem. Protože se jednotlivé rozměry lišily minimálně, je výsledná chyba zanedbatelná. Pokud by však byl požadavek na přesnější

zadání geometrie, bylo by výhodnější zadat konstrukci ve 3D rozměrech, kde by se mohly projevit i veškeré nerovnosti prvků. V příkazu „sections“ byl nadefinován i způsob meshování průřezu.



Obr. 21: meshování průřezu.

Dále následovalo vytvoření výpočetní sítě (Mesh). Síť byla nadefinována délkou prvku, jež byla zvolena 0,05 m, z důvodu dosažení optimálních výsledků. Ukázka nameshované konstrukce je uvedena na Obr. 22.



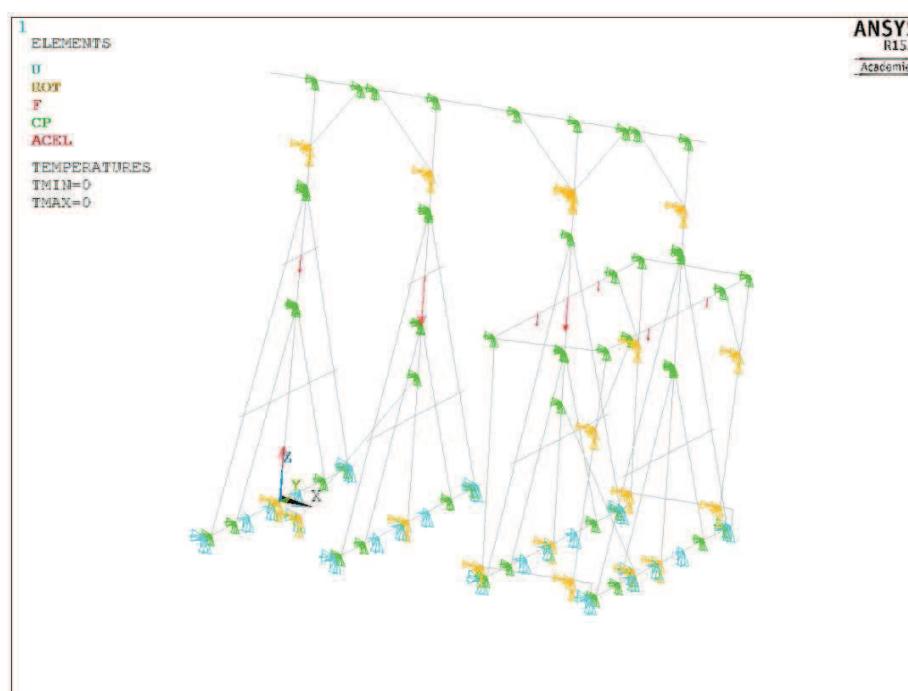
Obr. 22: nameshovaná konstrukce.

Posledním krokem v části preprocesor bylo zadání zatížení a okrajových podmínek. Konstrukce byla posuzována pouze na statické účinky, neboť posouzení dynamických účinků předpokládá znalosti nad rámec bakalářského studia. Zatížení konstrukce je tudíž pouze stálé a to vlastní tíha a tíha zvonů. Vlastní tíhu počítá program na základě materiálových a rozměrových charakteristik, tíha každého zvonu byla zadána pomocí dvojice sil, umístěných v místě osazení hlavy zvonu do trámu a byla vypočítána z hmotností jednotlivých zvonů a z objemu a objemové hmotnosti hlavy každého zvonu. Hmotnosti zvonů, výslednice dvojic sil a jednotlivé síly jsou uvedeny v Tab. 3., umístění jednotlivých sil je patrné Obr. 23.

Tab. 3: zatížení zvony [1].

Jméno zvonu	Hmotnost zvonu [kg]	Výslednice dvojice sil [kN]	Jednotlivé síly [kN]
sv. Bartoloměj	1070	11,20	5,60
sv. Salvátor	560	5,80	2,90
sv. Josef	386	4,00	2,00
P. Maria	293	3,10	1,55

Okrajové podmínky byly zadávány u kloubově připojených prutů, kde každému prutu byly odebrány posuny i rotace ve všech směrech. Dále byly zadány podpory v místech, kde konstrukce leží na dalších trámech. Tyto trámy jsou pod podlahou, a tudíž nebyly součástí skenu a tedy ani výpočtu. Podpory na krajích trámu odebírají posuny u_x , u_y a u_z a podpory uprostřed trámu odebírají posuny u_y a u_z , neboť trámy jsou osazeny na ozubu, jež zabraňuje pohybu trámu v ose y . Zadané okrajové podmínky jsou též na Obr. 23.

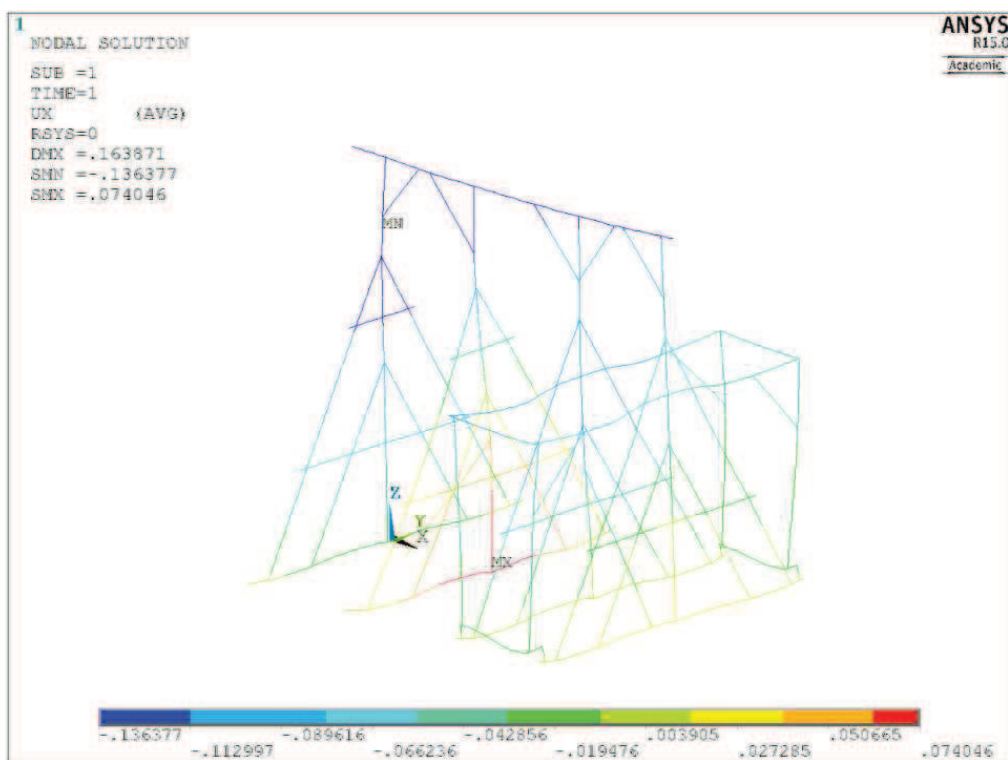


Obr. 23: okrajové podmínky.

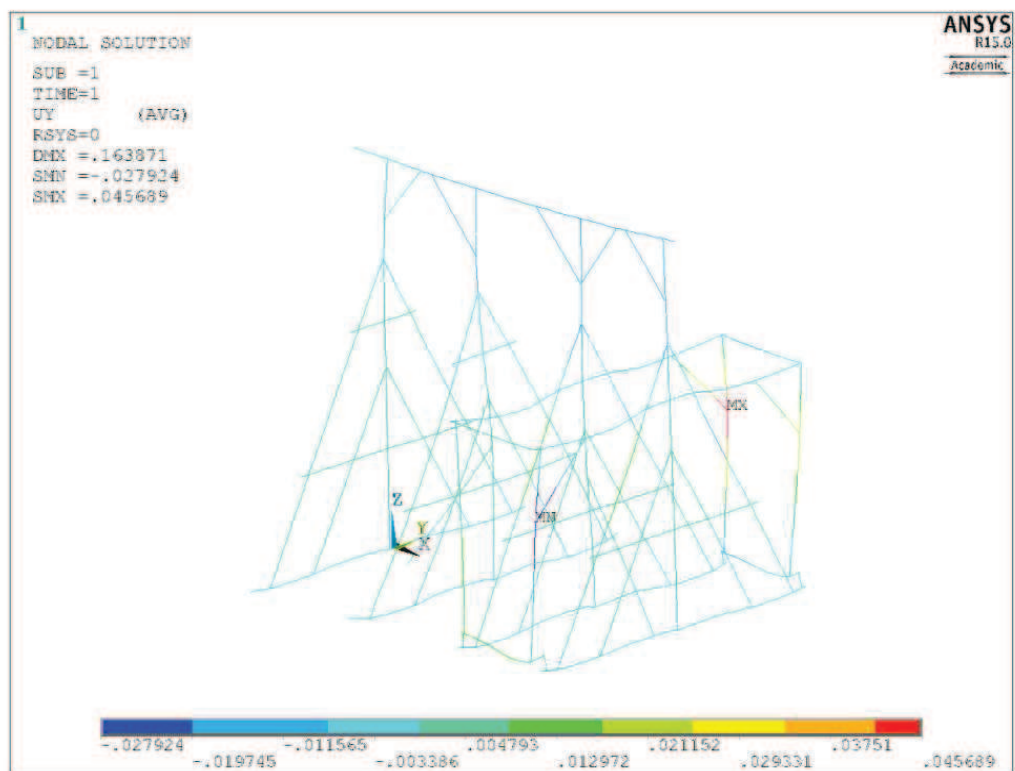
4.2 Solvers (řešiče) a postprocesor

V části programu solvers se pouze zadal typ výpočtu, tedy statická analýza a pomocí příkazu solve -> current LS byl spuštěn výpočet.

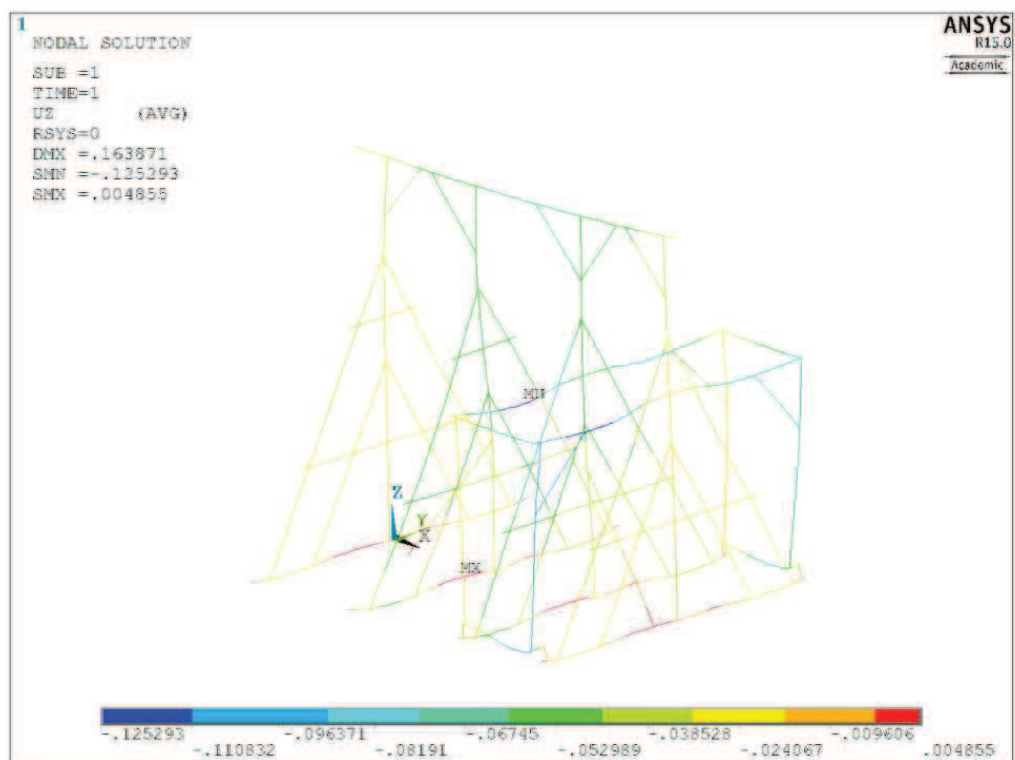
V postprocesoru již byly pouze vygenerovány obrázky posunů ve směrech x , y a z , měřítko deformací bylo nastaveno na automatický výběr na 1,4825 a obrázek sumy všech posunů vůči původní konstrukci s nastaveným měřítkem 3. Vzhledem k tomu, že byla konstrukce skenovaná již ve zdeformovaném stavu a následně během úprav skenu byly narovnány trámy, jsou výsledné hodnoty posunů nereálné, a tudíž ani nebyla konstrukce posuzována na mezní stav použitelnosti.



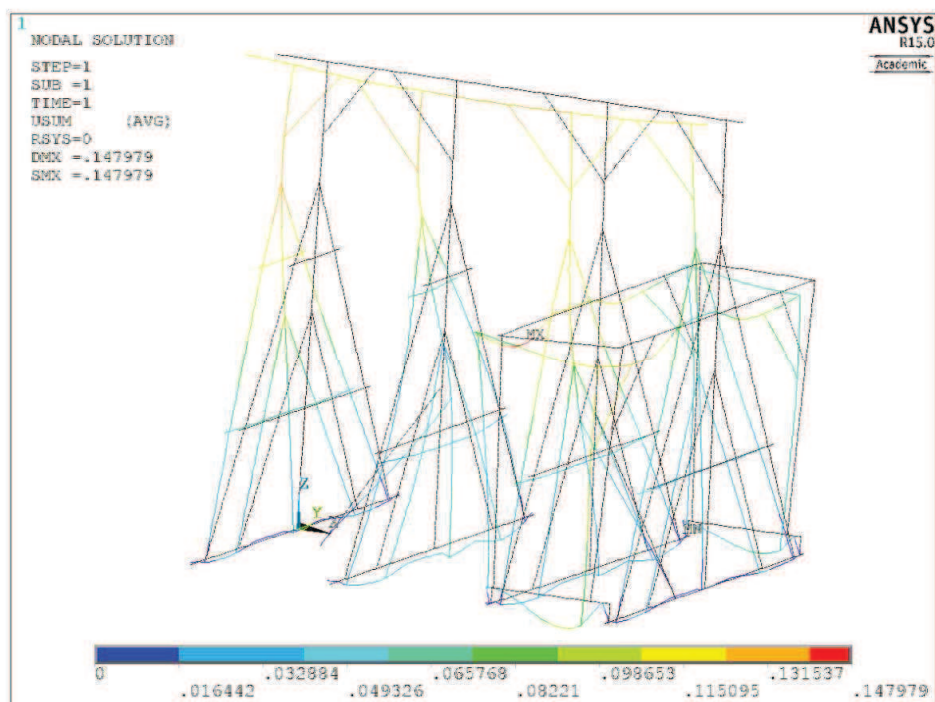
Obr. 24: posun ve směru x .



Obr. 25: posun ve směru y.

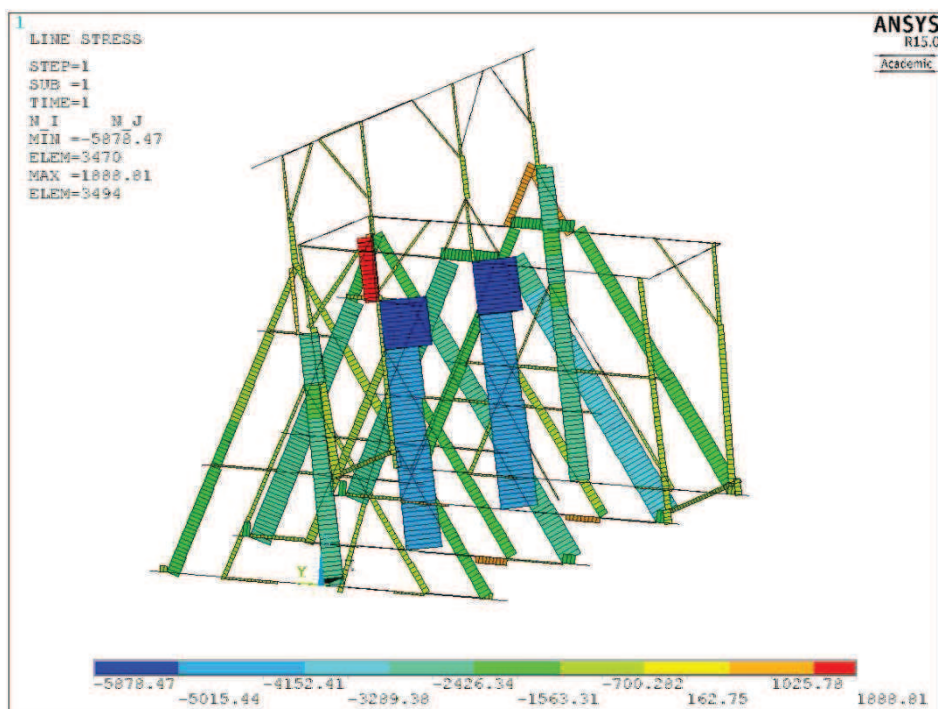


Obr. 26: posun ve směru z.

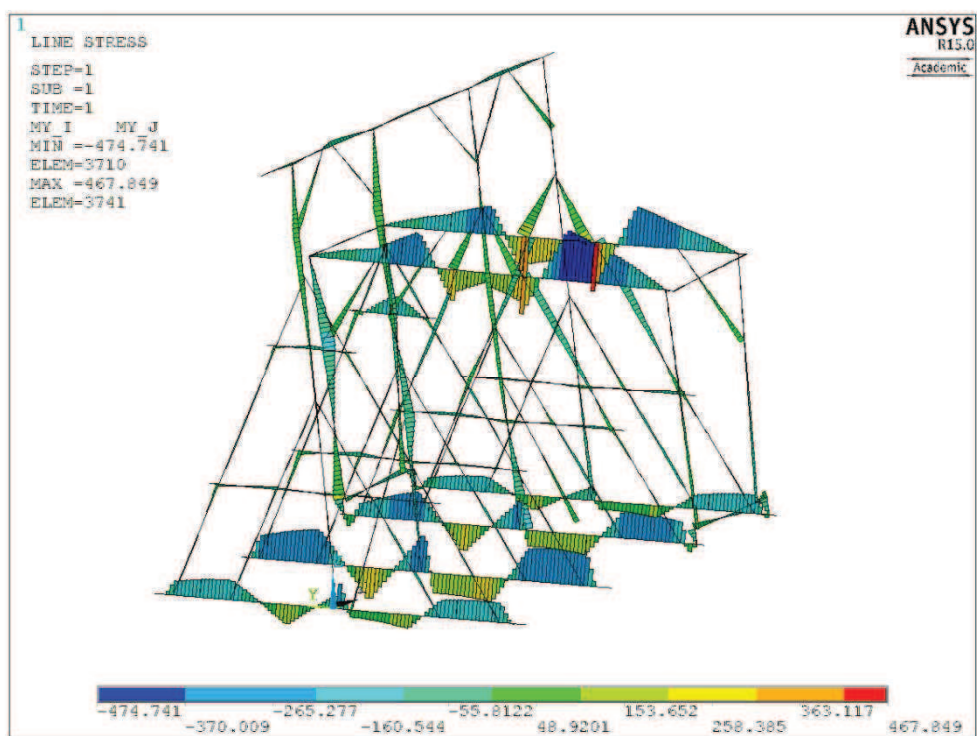


Obr. 27: všechny posuny v porovnání s původní konstrukcí, měřítko 3.

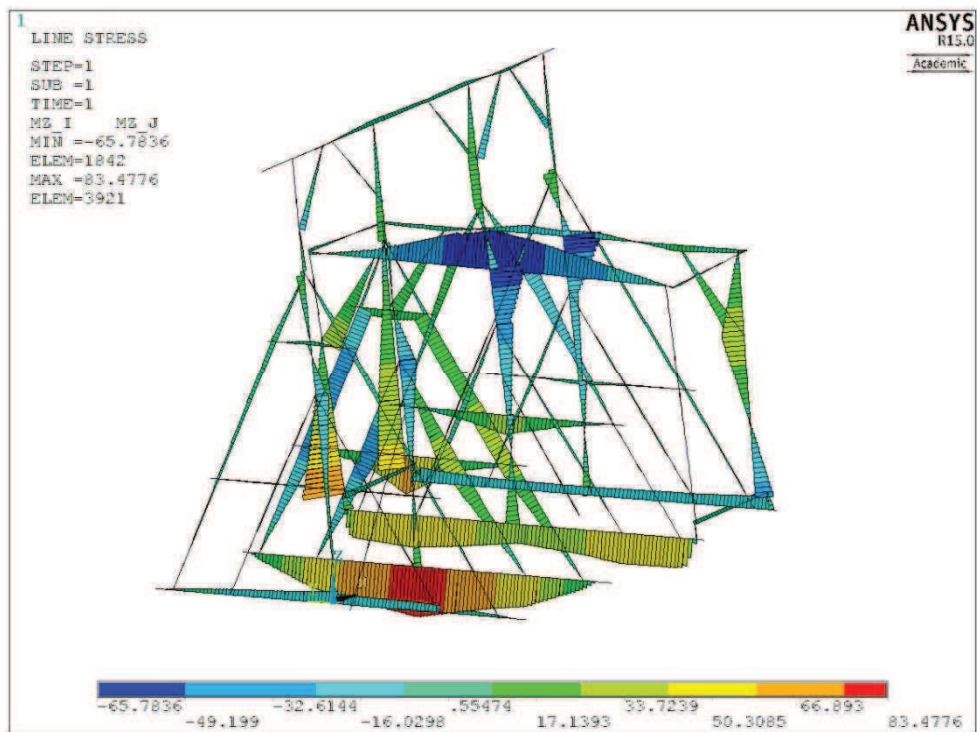
Dále byly pomocí příkazu Element table získány vnitřní síly konstrukce N , M_y , M_z , V_y a V_z , které byly později použity pro posouzení konstrukce. Vnitřní síly jsou vyobrazeny na následujících obrázcích. Výpis těchto vnitřních sil pro všechny pruty je uveden v příloze P. 1.



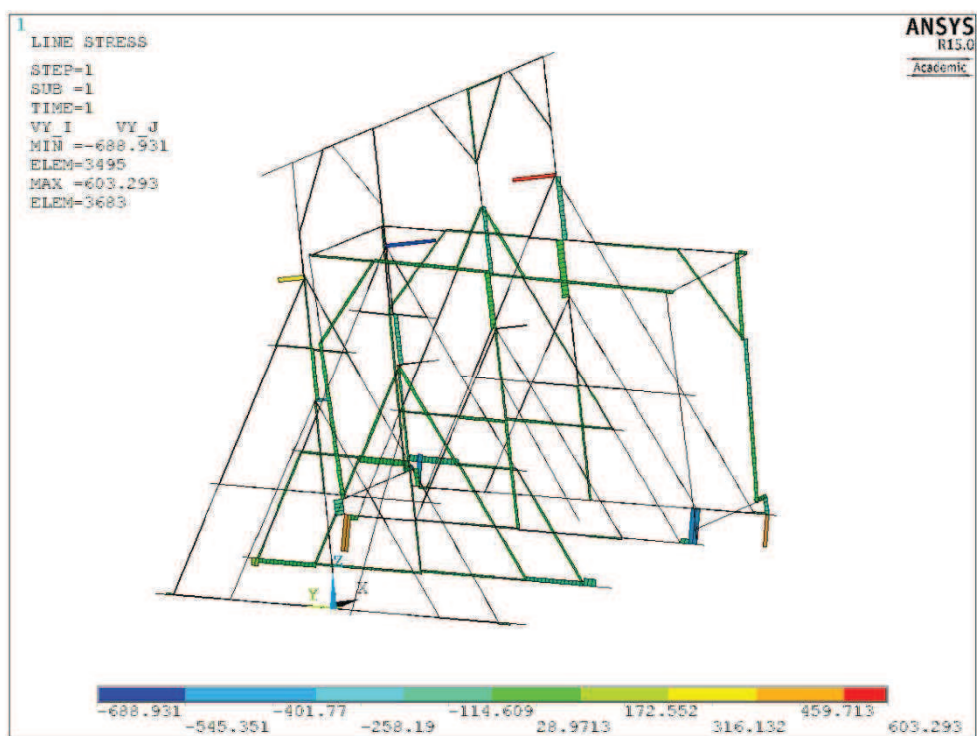
Obr. 28: průběh normálových sil N .



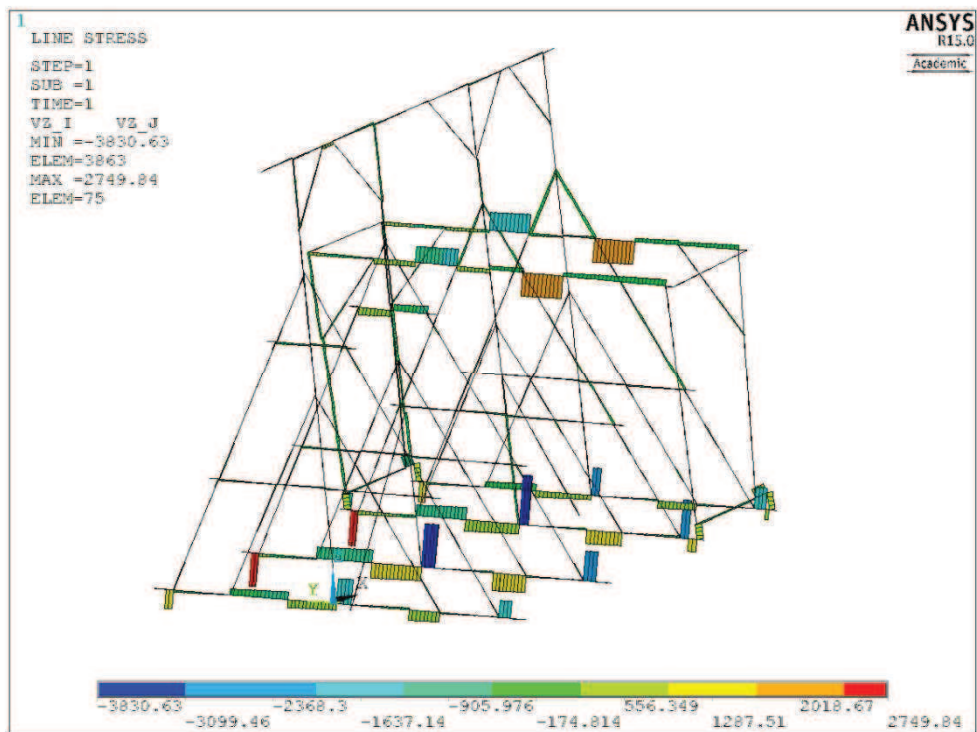
Obr. 29: průběh momentu M_y .



Obr. 30: průběh momentu M_z .



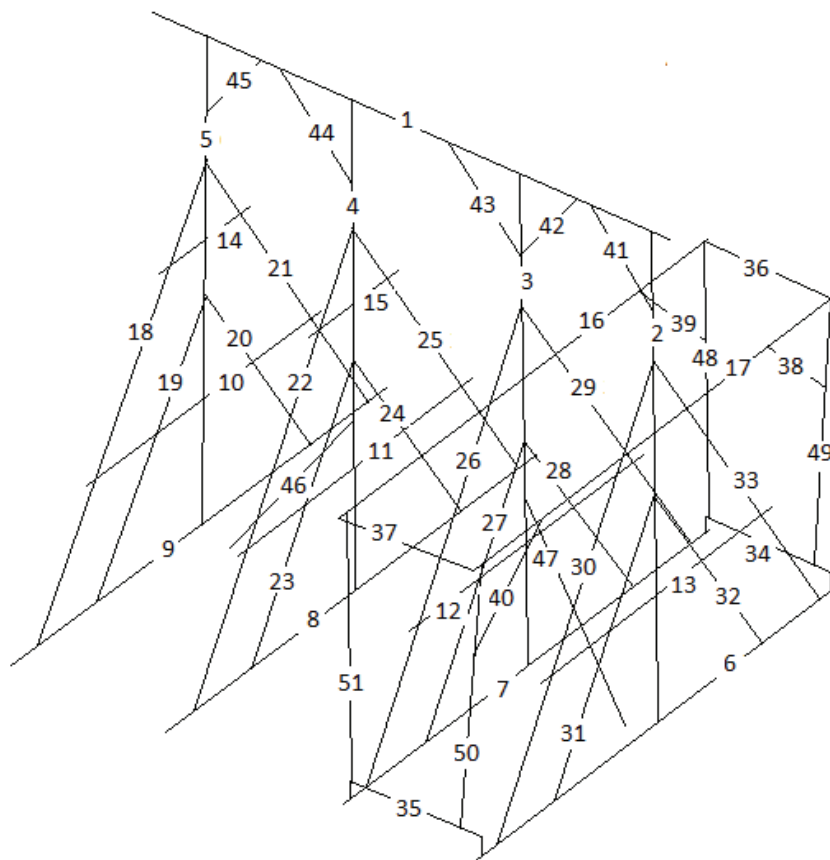
Obr. 31: průběh posouvajících sil V_y .



Obr. 32: průběh posouvajících sil V_z .

5 Posouzení

V této kapitole je provedeno posouzení vybraných prvků konstrukce. Pruty zvonové stolice se posuzují standardně podle zásad ČSN EN 1995-1 [12]. Pro posudek byly využity výstupy z programu ANSYS. Hodnoty posouvajících sil V_y byly velmi malé, a proto byly zanedbány. Kompletní posouzení bylo provedeno v programu Microsoft Excel a bylo provedeno v souladu s ukázkami výpočtu v této kapitole. Posouzení se nachází v přílohách P. 2 až P. 6. Pro orientaci ve výpočtech je na Obr. 33 uvedena konstrukce s očíslovanými pruty.



Obr. 33: konstrukce s očíslovanými pruty.

5.1 Vstupní údaje

V Tab. 4 jsou uvedené některé vstupní údaje, jež jsou stejné pro všechny posuzované prvky konstrukce. Tyto údaje byly získány z tabulek uvedených v ČSN EN 1995-1 Navrhování dřevěných konstrukcí na základě typu dřeva, třídy pevnosti, druhu zatížení a vlhkosti prostředí.

Tab. 4: vstupní údaje [12].

Třída trvání zatížení:	stálé zatížení
Třída provozu:	2
Dílčí součinitel vlastnosti materiálu:	$\gamma_M = 1,3$
Modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti:	$K_{mod} = 0,6$
	$k_m = 0,7$
Ohyb [MPa]	$f_m = 20$
Tah // s vlákny [MPa]	$f_{t,0,k} = 12$
Tah $\perp$ k vláknům [MPa]	$f_{t,90,k} = 0,4$
Tlak // s vlákny [MPa]	$f_{c,0,k} = 19$
Tlak $\perp$ k vláknům [MPa]	$f_{c,90,k} = 2,3$
Smyk	$f_{v,k} = 3,6$
Modul pružnosti [GPa]	$E_{0,mean} = 9,5$
// s vlákny [GPa]	$E_{0,05} = 6,4$
Průměr modulu pružnosti $\perp$ [GPa]	$E_{90,mean} = 0,32$
Průměr modulu pružnosti ve smyku [GPa]	$G_{mean} = 0,59$
Průměrná hustota [kg/m ³]	$\rho_{mean} = 390$

5.2 Příklad posouzení prutu namáhaného tahem

Ukázka je provedena na prutu č. 4.

Normálová síla:

$$N = 1873,1 \text{ N}$$

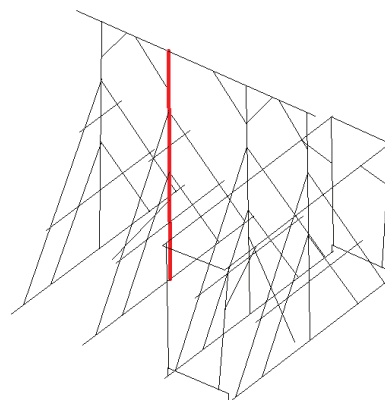
Plocha průřezu:

$$A_{eff} = 72000 \text{ mm}^2$$

Návrhové napětí v tahu:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N}{A_{eff}} = \frac{1873,1}{72000} = 0,026 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost dřeva v tahu:



Obr. 34: příklad posouzení prutu č. 4 namáhaného tahem.

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{12}{1,3} = 5,538 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{0,026}{5,538} = 0,0047 \leq 1$$

VYHOVUJE

5.3 Příklad posouzení prutu namáhaného tlakem

Ukázka je provedena na prutu č. 2.

Normálová síla:

$$N = 2439,3 \text{ N}$$

Plocha průřezu:

$$A_{eff} = 72000 \text{ mm}^2$$

Návrhové napětí v tlaku:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A_{eff}} = \frac{2439,3}{72000} = 0,034 \text{ MPa}$$

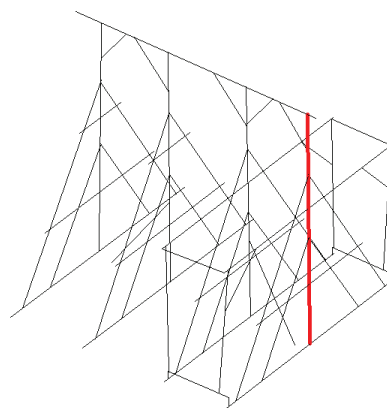
Návrhová pevnost dřeva v tlaku:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{19}{1,3} = 8,769 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,034}{8,769} = 0,0039 \leq 1$$

VYHOVUJE



Obr. 35: příklad posouzení prutu č. 2 namáhaného tlakem.

5.4 Příklad posouzení prutu namáhaného kombinací ohybu a tahu

Ukázka je provedena na prutu č. 8.

Moment:

$$M_y = 342,59 \text{ Nm}$$

$$M_z = 83,48 \text{ Nm}$$

Normálová síla:

$$N = 849,55 \text{ N}$$

Plocha průřezu:

$$A_{eff} = 62400 \text{ mm}^2$$

Návrhové napětí v tahu:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N}{A_{eff}} = \frac{1873,1}{72000} = 0,014 \text{ MPa}$$

Rozměry průřezu:

$$b = 240 \text{ mm}$$

$$h = 260 \text{ mm}$$

Průřezový modul k ose y:

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 240 \cdot 260^2 = 2704000 \text{ mm}^3$$

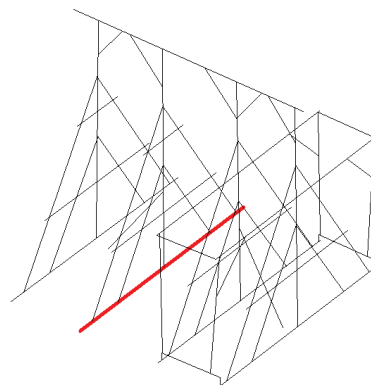
Průřezový modul k ose z:

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 260 \cdot 240^2 = 2496000 \text{ mm}^3$$

Návrhové napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{342,59}{2704000} = 0,00013 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{83,48}{2496000} = 0,00003 \text{ MPa}$$



Obr. 36: příklad posouzení prutu č. 8 namáhaného kombinací ohybu a tahu.

Návrhová pevnost dřeva v tahu:

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{12}{1,3} = 5,538 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost dřeva v ohybu:

$$f_{m,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{20}{1,3} = 9,231 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,014}{5,538} + \frac{0,00013}{9,231} + 0,7 \cdot \frac{0,00003}{9,231} = 0,0025 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,014}{5,538} + 0,7 \cdot \frac{0,00013}{9,231} + \frac{0,00003}{9,231} = 0,0025 \leq 1$$

VYHOVUJE

5.5 Příklad posouzení prutu namáhaného kombinací ohybu a tlaku

Ukázka je provedena na prutu č. 16.

Moment:

$$M_y = 474,74 \text{ Nm}$$

$$M_z = 65,78 \text{ Nm}$$

Normálová síla:

$$N = 1461,5 \text{ N}$$

Plocha průřezu:

$$A_{eff} = 58500 \text{ mm}^2$$

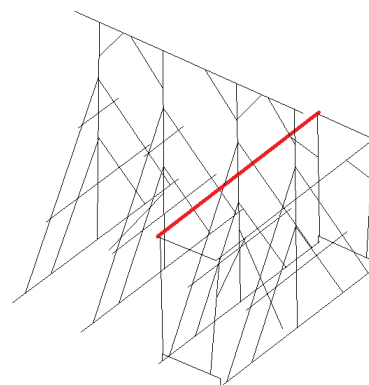
Návrhové napětí v tlaku:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A_{eff}} = \frac{1461,5}{58500} = 0,025 \text{ MPa}$$

Rozměry průřezu:

$$b = 260 \text{ mm}$$

$$h = 225 \text{ mm}$$



Obr. 37: příklad posouzení prutu č. 16 namáhaného kombinací ohybu a tlaku.

Průřezový modul k ose y:

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 260 \cdot 225^2 = 2193750 \text{ mm}^3$$

Průřezový modul k ose z:

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 225 \cdot 260^2 = 2535000 \text{ mm}^3$$

Návrhové napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{474,74}{2193750} = 0,00022 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{65,78}{2535000} = 0,00003 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost dřeva v tlaku:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{19}{1,3} = 8,769 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost dřeva v ohybu:

$$f_{m,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{20}{1,3} = 9,231 \text{ MPa}$$

Moment setrvačnosti průřezu k ose y:

$$I_y = 246796875 \text{ mm}^4$$

Moment setrvačnosti průřezu k ose z:

$$I_z = 329550000 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti k ose y:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{246796875}{58500}} = 64,952 \text{ mm}$$

Poloměr setrvačnosti k ose z:

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{329550000}{58500}} = 75,056 \text{ mm}$$

Systémové délky prutu pro vzpěry:

$$L_y = 4532,3 \text{ mm}$$

$$L_z = 1766,4 \text{ mm}$$

Součinitel:

$$\beta_y = 1,0$$

$$\beta_z = 1,0$$

Vzpěrná délka prutu:

$$L_{cry} = L_y \cdot \beta_y = 4532,3 \cdot 1,0 = 4532,3 \text{ mm}$$

$$L_{crz} = L_z \cdot \beta_z = 1766,4 \cdot 1,0 = 1766,4 \text{ mm}$$

Štíhlost:

$$\lambda_y = \frac{L_{cry}}{i_y} = \frac{4532,3}{64,952} = 69,779$$

$$\lambda_z = \frac{L_{crz}}{i_z} = \frac{1766,4}{75,056} = 23,535$$

Limitní štíhlost:

$$\lambda_{LIM} = 120$$

$$\lambda_y = 69,779 \leq 120$$

$$\lambda_z = 23,535 \leq 120$$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{69,779}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{19}{6400}} = 1,210$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{23,535}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{19}{6400}} = 4,029$$

Součinitel pro rostlé dřevo:

$$\beta_c = 0,2$$

Součinitel κ :

$$\kappa_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,210 - 0,3) + 1,210^2)$$

$$\kappa_y = 1,323$$

$$\kappa_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (4,029 - 0,3) + 4,029^2)$$

$$\kappa_z = 8,987$$

Součinitel κ_c :

$$\kappa_{cy} = \frac{1}{\kappa_y + \sqrt{\kappa_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,323 + \sqrt{1,323^2 - 1,210^2}} = 0,538$$

$$\kappa_{cz} = \frac{1}{\kappa_z + \sqrt{\kappa_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{8,987 + \sqrt{8,987^2 - 4,029^2}} = 0,059$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,025}{8,769} + \frac{0,00022}{9,231} + 0,7 \cdot \frac{0,00003}{9,231} = 0,0053 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,025}{8,769} + 0,7 \cdot \frac{0,00022}{9,231} + \frac{0,00003}{9,231} = 0,0485 \leq 1$$

VYHOVUJE

5.6 Příklad posouzení prutu namáhaného smykem

Ukázka je provedena na prutu č. 7.

Posouvající síla:

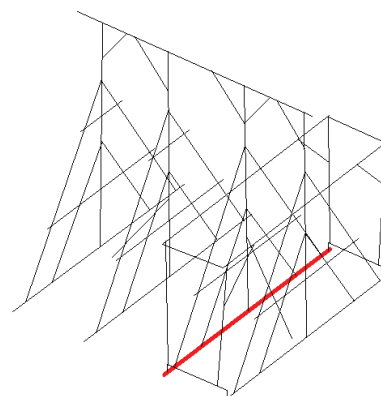
$$V_z = 3830,6 \text{ N}$$

Součinitel:

$$k_{cr} = 0,67$$

Návrhové napětí ve smyku:

$$\tau_d = \frac{3}{2 \cdot k_{cr}} \cdot \frac{V_z}{A_{eff}} = \frac{3}{2 \cdot 0,67} \cdot \frac{3830,6}{62400} = 0,137 \text{ MPa}$$



Obr. 38: příklad posouzení prutu č. 7 namáhaného smykem.

Návrhová pevnost ve smyku:

$$f_{vd} = K_{mod} \cdot \frac{f_{vk}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{3,6}{1,3} = 1,662 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\tau_d}{f_{vd}} = \frac{0,137}{1,662} = 0,0827 \leq 1$$

VYHOVUJE

Závěr

Cílem této práce bylo zpracování datového souboru, tzv. mračna bodů, tak aby vznikl funkční editovatelný geometrický objekt, v tomto případě statický model, jež je možné dále využívat pro potřeby stavební mechaniky.

V první kapitole je stručně popsána historie Zábřežské zvonice. Zvonová stolice v této zvonici byla naskenována za použití tzv. laserscaneru, který je stručně popsán v kapitole 2. V této kapitole je uvedeno nastavení skeneru a jsou formulovány zásady skenování, jež byly definovány na základě poznatků získaných při zpracování dat.

Samotné zpracování dat proběhlo postupně v několika programech a je popsáno v kapitole 3. Nejdříve v programu SCENE, kde byla data zarovnána, promazána a redukována, dále v programu Geomagic design X, který umožnil postupné převedení mračna bodů nejdříve na polygonovou síť a následně na objektový model a nakonec byly využity programy AutoCAD a Rhinoceros 3D pro konečné úpravy objektového modelu a vytvoření statického modelu.

Dalšími úkoly této práce bylo vytvoření MKP modelu a statická analýza konstrukce, což je popsáno v kapitolách 4 a 5. V kapitole 4 je popsána práce v programu ANSYS, kam byl importován statický model. Taktéž v něm byly zadány materiálové charakteristiky, průřezy jednotlivých prutů, konečné prvky a okrajové podmínky. Následně byl proveden výpočet a byly vygenerovány deformace a vnitřní síly konstrukce. V kapitole 5 jsou ukázky posouzení určitých prutů dle ČSN EN 1995-1. Výpočty dalších prutů obsahují přílohy P. 2 až P. 6. Z výsledků je zřejmé, že konstrukce ze statického hlediska vyhoví s velkými rezervami.

V rámci této práce tedy byla ověřena možnost využití metody získávání modelů konstrukcí pomocí laserscanerů pro účely stavební mechaniky. Na základě poznatků získaných při zpracování bakalářské práce je zřejmé, že tato metoda by se mohla využívat pro zaměřování velkých a těžko dostupných objektů (např. mosty), či konstrukcí složených z velkého množství prvků (např. historické krovky). U jednodušších konstrukcí je méně pracné i ekonomicky výhodnější použít klasické metody zaměřování. Tyto dva aspekty je vždy nutno objektivně posoudit a rozhodnout se, která metoda bude nejvhodnější.

Bibliografie

- [1] JOHN, František. *Farní kostel svatého Bartoloměje v Zábřeze*. Zábřeh, 2014.
- [2] JOHN, František a Petr KRŇÁVEK. *Farní muzeum Zábřeh - věž chrámu sv. Bartoloměje*. Zábřeh: Farní muzeum Zábřeh.
- [3] JOHN, František, Petr KRŇÁVEK a Aleš PÁTEK. *Zábřežské zvony*. Zábřeh: Farní muzeum Zábřeh, 2008. ISBN 9788025434529.
- JOHN, František a Petr ODSTRČIL. Historie a popis kostela sv. Bartoloměje.
- [4] *Římskokatolická farnost Zábřeh* [online]. 2010
[cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://rkfzabreh.rps.cz/historie_bartolomej.html
- [5] 3D SCAN. *Metrologické řešení: Produkty* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/skenery>
- [6] FARO. *Scene* [program]. Version 5.4.4. [přístup 4. prosince 2014]. Dostupné z: <http://www.faro.com/en-us/products/faro-software/scene/downloads#main>.
- [7] 3D SYSTEMS. *Geomagic Design X* [program]. [přístup 18. února 2015]. Dostupné z: <http://www.rapidform.com/products/xor/how-to-buy/>.
- [8] AUTODESK. *Autodesk AutoCAD 2015* [program]. [přístup 2. března 2015]. Dostupné z: <http://www.autodesk.cz/products/autocad/free-trial>.
- [9] ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. *Rhinoceros 3D* [program]. Version 5. [přístup 8. dubna 2015]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/download/rhino/5/latest>
- [10] ANSYS. *ANSYS Mechanical* [program]. Version 15.0. [přístup 22. dubna 2015]. Dostupné z: www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Analysis/ANSYS+Mechanical.
- [11] LUNGA, Radek a Jaroslav SOLAŘ. *Kostelní věže a zvonice*. Praha: Grada Publishing, 2010. ISBN 9788024712369.
- [12] ČSN EN 1995-1-1: Eurokód 5: *Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

Seznam obrázků

Obr. 1: původní podoba kostela se sanktusovou vížkou (a) [4]; současná podoba kostela (b).	2
Obr. 2: ukázky typů laserscanerů [5].	3
Obr. 3: rozmístění skenerů - pohled shora.	4
Obr. 4: neúplně naskenovaná konstrukce.	5
Obr. 5: příklad nežádoucího předmětu.	5
Obr. 6: ScanFit.	7
Obr. 7: orientační značky pro fitování - koule (a) a terčík (b).	8
Obr. 8: ukázka příliš podrobného smazání provazu (a); ukázka částečně promazaného skenu (b).	8
Obr. 9: zobrazení všech skenů najednou před promazáním okolního šumu.	9
Obr. 10: předzarovnání pomocí orientačních bodů.	10
Obr. 11: zarovnaná konstrukce pomocí funkce bestfit.	10
Obr. 12: vygenerovaná polygonová síť.	11
Obr. 13: polygonová síť zvonu.	12
Obr. 14: tvoření a upravování mesh skech jako podkladu pro vytvoření tělesa.	12
Obr. 15: vygenerované těleso zvonu s barevnou škálou odchylek od polygonové sítě.	12
Obr. 16: ukázka prokládání ploch polygonovou sítí.	13
Obr. 17: importovaný geometrický model z programu Geomagic Design X před úpravou.	14
Obr. 18: 3D drátový model konstrukce.	14
Obr. 19: střednice jednotlivých trámů včetně naznačení jejich dimenzí.	15
Obr. 20: výsledný statický prutový model konstrukce.	15
Obr. 21: meshování průřezu.	17
Obr. 22: nameshovaná konstrukce.	17
Obr. 23: okrajové podmínky.	18
Obr. 24: posun ve směru x .	19
Obr. 25: posun ve směru y .	20
Obr. 26: posun ve směru z .	20
Obr. 27: všechny posuny v porovnání s původní konstrukcí, měřítko 3.	21
Obr. 28: průběh normálových sil N .	21
Obr. 29: průběh momentu M_y .	22
Obr. 30: průběh momentu M_z .	22
Obr. 31: průběh posouvajících sil V_y .	23
Obr. 32: průběh posouvajících sil V_z .	23
Obr. 33: konstrukce s očíslovanými pruty.	24
Obr. 34: příklad posouzení prutu č. 4 namáhaného tahem.	25
Obr. 35: příklad posouzení prutu č. 2 namáhaného tlakem.	26
Obr. 36: příklad posouzení prutu č. 8 namáhaného kombinací ohybu a tahu.	27
Obr. 37: příklad posouzení prutu č. 16 namáhaného kombinací ohybu a tlaku.	28
Obr. 38: příklad posouzení prutu č. 7 namáhaného smykem.	31

Seznam tabulek

Tab. 1: nastavení laserscaneru.....	4
Tab. 2: materiálové charakteristiky [12].....	16
Tab. 3: zatížení zvony [1].....	18
Tab. 4: vstupní údaje [12].....	25

Seznam příloh

P. 1: Hodnoty vnitřních sil z programu ANSYS.....	I
P. 2: Posouzení prvků namáhaných tahem.....	IV
P. 3: Posouzení prvků namáhaných tlakem.....	V
P. 4: Posouzení prvků namáhaných kombinací ohybu a tahu.....	VII
P. 5: Posouzení prvků namáhaných kombinací ohybu a tlaku.....	VIII
P. 6: Posouzení prvků namáhaných smykem.....	XI