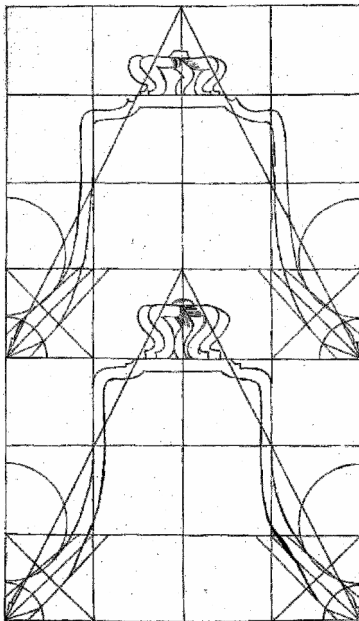
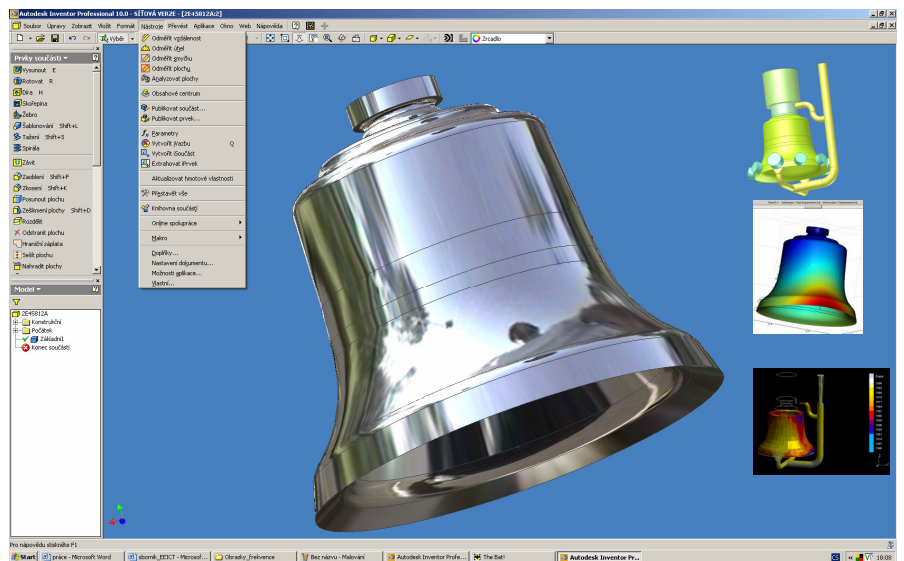


Analýza zvonu



16.stol n. l.



21.stol.

Autoři:

Jana Hejlová

Aneta Neubauerová

VOŠ a SPŠ, Studentská 1
591 01 Žďár nad Sázavou
3. ročník

Konzultant práce:

Dr. Ing. Josef Příhoda

VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou

Žďár nad Sázavou, 2007
Kraj Vysočina

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Prohlašujeme tímto, že jsme soutěžní práci vypracovali samostatně pod vedením Dr. Ing. Josefa Příhody a dalších konzultantů uvedených v práci a uvedly v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další informační zdroje včetně Internetu.

Ve Žďáře nad Sázavou dne 22.3.2007

vlastnoruční podpisy autorek

Na úvod bychom chtěly poděkovat všem, kteří nám s prací pomáhali. Jsou to:

Dr. Ing. Josef Příhoda, ředitel VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou, metodické vedení práce

Ing. Jaromír Ošťádal, výrobní ředitel ŽĎAS a. s., technologie výroby

Ing. Martin Homola, metalurgie ŽĎAS a. s. technologie výroby

Bc. Arnošt Kříž, metalurgie ŽĎAS a. s., oblast CAD

Ing. Rudolf Železný, metalurgie ŽĎAS a. s., simulace odlévání a chladnutí

Ing. Karel Bittner, Humusoft s. r. o., Praha, analýza namáhání

Ing. František Fridrich Ph.D., CME, oblast mechanického namáhání

Petr Rudolf Manoušek, konzultace o výrobě zvonů

Jana Kadlecová, Zdravotní ústav Žďár nad Sázavou, akustická měření

ÚVOD	2
HISTORIE VÝROBY ZVONŮ	2
<i>Základní pojmy</i>	4
<i>Naše nejstarší zvony</i>	5
<i>Zajímavosti o zvonech</i>	5
<i>Tradice odlévání zvonů ve Žďáře nad Sázavou</i>	6
NÁVRH V CAD	7
POČÍTAČOVÁ SIMULACE PROUDĚNÍ.....	8
POČÍTAČOVÁ SIMULACE CHLADNUTÍ.....	8
POPIS TECHNOLOGIE VÝROBY ZVONU	9
<i>Výroba slévárenského modelu a jaderníku</i>	9
<i>Zaformování a odlévání</i>	10
POČÍTAČOVÁ ANALÝZA DEFORMACÍ A NAPĚTÍ.....	11
<i>Vytvoření geometrie modelu</i>	11
<i>Zadání fyzikálních vlastností prostředí</i>	12
<i>Zadání okrajových podmínek úlohy</i>	13
<i>Vytvoření sítě konečných prvků</i>	15
<i>Nastavení a spuštění řešiče</i>	16
<i>Zobrazení výsledků</i>	16
<i>Vyhodnocování výsledků a diskuze</i>	18
<i>Komentář k zobrazení deformací:</i>	19
<i>Komentář k zobrazení napětí:</i>	19
AKUSTICKÁ ANALÝZA – VÝPOČET VLASTNÍCH FREKVENCÍ A TVARŮ (FEM)	20
MĚŘENÍ AKUSTIKY ZVONU – FREKVENČNÍ ANALÝZA	22
ZÁVĚR.....	24
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	24
PŘÍLOHA Č.1	25
PŘÍLOHA Č.2	32

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Úvod

V roce 2006 jsme se s Dr. Ing. Josefem Příhodou dohodly na tématu práce **Odlévání zvonu**. Tato práce obsahovala CAD návrh geometrie zvonu, počítačovou simulaci odlévání a chladnutí zvonu ve formě. Další částí byl popis technologického postupu výroby zvonu v podmínkách moderně vybavené slévárenské firmy – **a. s. ŽĎAS Žďár nad Sázavou**. Výsledky práce byly prezentovány na výstavě **FOND-EX 2006** v Brně. Práce také získala první místo v sekci středoškolských projektů soutěže **EEICT 2006**, kterou pořádalo VUT Brno (FIT a FEKT). Do SOČ tato práce nebyla přihlášena, protože jsme ji chtěly doplnit a rozšířit. Toto rozšíření o výpočty MKP je nyní hotovo, práce je doplněna o výpočty deformací a napětí zvonu, výpočty vlastních frekvencí zvonu a akustickou analýzu zvuku. Její původní název jsme změnilly na nový název **Analýza zvonu**. Práce kompletně popisuje aplikace moderních technologií ICT na výrobek, který se již vyrábí více než tisíc let. Tyto aplikace jsou:

- **CAD návrh zvonu**
- **Počítačová simulace proudění ve slévárenské formě**
- **Počítačová simulace chladnutí odlitku ve formě**
- **Moderní metody odlévání zvonů**
- **Analýza deformací a napětí metodou konečných prvků**
- **Výpočet vlastních frekvencí a tvarů metodou konečných prvků**
- **Akustická frekvenční analýza (měření)**

Historie výroby zvonů

Pro uvedení do problematiky krátce popíšeme historii výroby zvonů. Zde vycházíme z literatury [1].

Zvonařství je profesí velmi starou a přitom navzdory staletím prakticky nestárnoucí. Stejně zůstávají výrobní postupy, stejně je využití finálního výrobku a stejná je i skrytá touha každého zvonaře: vytvořit dílo, které přežije svého tvůrce. Zvon je – a od pradávna byl – především hudebním nástrojem a dobrý zvonař vždy usiloval o maximální dokonalost při své práci. Nelze tvrdit, že výrobky zvonařů v 21. století jsou vždy dokonalejší než práce jejich předchůdců. Uvědomíme-li si technické podmínky, za jakých vznikaly zvony jako např. slavná „Gloriosa“ z r. 1497 v německém Erfurtu, „Car Kolokol“ z r. 1734 či největší český zvon „Zikmund“ z r. 1549 (1548?), nezbyvá než vyslovit slova uznání a projevit úctu před dávnými mistry.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Zvonař musí předem vědět, jak bude zvon znít. Proto už téměř 1000 let je profil zvonu matematicky vypočítán a neustále zdokonalován. Jaké metody a pomůcky však k tomu zvonaři v minulosti používali, to se můžeme jen domýšlet. Přitom dosud existují zvony z 13. a 14. století, které bez nejmenších výhrad splňují i dnešní přísné normy pro schvalování zvonů. Dobrý zvonař vždy věděl, jak mnoho lze pokazit nedodržením čistoty nebo špatným složením zvonoviny. Přestože dříve nebyly k dispozici současné moderní technologie pro zpracování kovů, ani zkušební laboratoře, chemický rozbor zvonoviny z historických zvonů mnohdy ukáže tak přesné složení slitiny, že ho často s potížemi dosahujeme dnes. Otázkou opět zůstává, jakými metodami (a zda vůbec) kdysi prováděli analýzu kovu. Podobně lze pokračovat dále. Složení formovacích směsí, receptury různých nátěrů, vhodné teploty a doby sušení forem – vše je založeno na letité zkušenosti a množství často těžce nabytých vědomostí. Proto opravdové tajemství výroby zvonu není ukryto ve složení zvonoviny nebo v jediném matematickém vzorci. Skutečnost je mnohem prostší: dokonalá znalost věci na základě správně vyhodnocených informací, tedy moderně řečeno „know how“. Podstata je však v tom, že sbírání potřebných údajů často trvá déle než jeden lidský život. Proto tradice navazujících generací platí ve zvonařství možná více než v mnohých jiných oborech lidské činnosti a je naprosto logické, že tyto znalosti jsou největším pokladem zvonařského rodu. Se zvonařstvím byla od nepaměti propojena i další řemesla, především kovářství a tesařství. Zvonař byl často současně také cínařem či konvářem, v některých dobách i puškařem a dělolijcem. Důvody byly obvykle zcela pragmatické: více oblastí činnosti poskytovalo zvonaři značnou soběstačnost a kromě toho zajišťovalo trvalou práci i v době dočasného útlumu zájmu o zvony. V dobách válek a později i válečných rekvizic se někteří zvonaři dokonce podíleli i na zbrojním programu a museli pomáhat při snímání a odvozu zvonů. Postavení zvonaře ve společnosti stojí také za zmínku. Jestliže v některých dobách sídlilo na Starém Městě pražském několik desítek zvonařů, jindy jich bylo zase jen „jako šafránu“. Vždy však zvonař představoval v mysli jiných lidí člověka, který ovládá cosi tajemného, neobvyklého a mystického. Zvonaři velmi často zasedali v městské radě a většinou byli váženými občany. Dočkali se nezřídka vysokých poct i vyznamenání, na něž byli patřičně hrdí. Obor zabývající se zvony a zvonařstvím se nazývá kampanologie (Campania je krajinná oblast ve střední Itálii, kde podle pověsti r. 409 biskup Paulinus vynalezl kovové zvony). Od té doby je zvon prvním významem slova „campana“. Zvon je specifický hudební nástroj z kovu, širokého významu a uplatnění. Kromě své základní funkce zvukového nástroje je také technickým výtvozem, ztvárněním vnější podoby výtvarným dílem a pro svou značnou

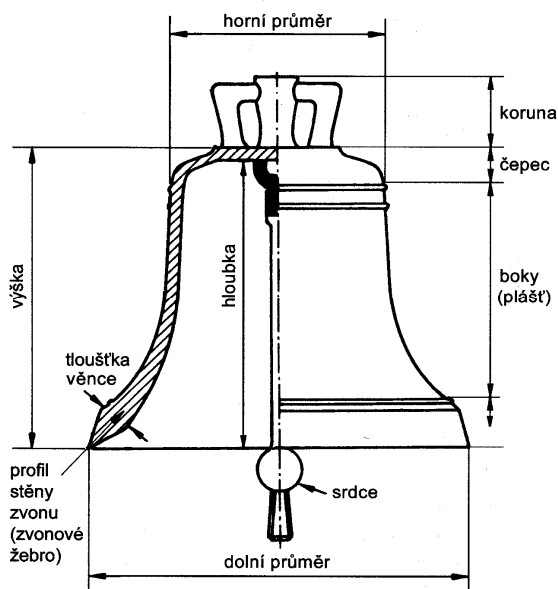
Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

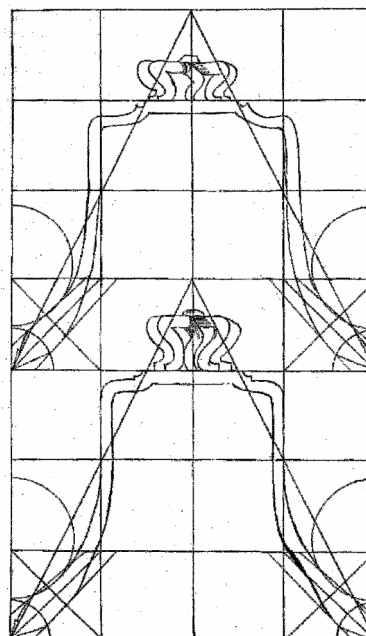
dokumentační hodnotu také historickou památkou. Původ zvonů sahá až hluboko do předkřesťanských dob. Nejstarší památky, jejichž tvar a velikost jsou jen skromnou předzvěstí dnešní podoby, pocházejí z vykopávek v Ninive v Asýrii z konce 3. tisíciletí před n. l. Za nejstarší zvon křesťanské Evropy se pokládá malý zvon zvaný „Kančí tesák“, nýtovaný ze tří železných desek. Zvon byl nalezen v kostele sv. Cecílie v Kolíně nad Rýnem a počátkem 20. st. byl uložen v tamním Uměleckoprůmyslovém muzeu. Od jednoduchých plechových, nýtovaných, tvarově rozmanitých zvonků (vesměs s oválným či čtvercovým půdorysem) se přecházelo postupně o odlévaným zvonům nejprve úlovitého typu. Pozdější gotický typ je považován za prvopočátek konečného zrození klasické podoby zvonu.

Základní pojmy

Dřevěný nosník, na kterém se zvon houpe, se nazývá **hlava** či **hlavice**, můžeme se také však setkat se staročeským pojmenováním „**jho, jařmo**“. Horní část zvonu, za kterou zvon visí, je šestiramenná nebo čtyřramenná **koruna**. Vrchol zvonu pod korunou je nazýván **čepec**, pod ním je **krk**, nebo také **plášť** a nejširší místo ve spodní části je **věnc**. Pak už následuje **hrana** neboli **špice**. Samotný tvar zvonu, promítnutý do síly jeho stěny, se nazývá **žebro**, nejsilnější místo věnce je **rána**. Uvnitř zvonu je zavěšeno kované **srdce** (4-8% hmotnosti zvonu). Některé uvedené pojmy jsou zřetelné z obrázků 1 a 2.



Obrázek 1 Názvy částí zvonu



Obr. 5. Křížkovy náčrtů zvonových žebor

Obrázek 2 Křížkovy náčrtů zvonových žebor

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Naše nejstarší zvony

Do Čech byly zvony přeneseny současně s prvními křesťanskými misemi. Počátek českého zvonařství bychom mohli datovat do období 1062-1092, a to dle zprávy mnicha sázavského. První skutečné památky českého zvonařství pocházejí z 13. století: Podle J. Brániše byly **nejstarší zvony z r. 1261 v Trhových Svinech** zničeny požárem v r. 1826, takže jednoznačně nejstarším dochovaným a datovaným zvonem v Čechách je zvon o spodním průměru 50 cm z r. 1286, který je uložen v Městském museu v Chebu. **Druhý v pořadí má být zvon „Maria“ v Chlumu nad Ohří s datací 1295.** Podle dochované legendy se zvon kdysi ztratil. **Třetím nejstarším a dosud funkčním zvonem je „Vilém“ v Havlíčkově Brodě z r. 1305 až 1335.** Zvon o spodním průměru 148 cm váží cca 1900 kg a o jeho stáří se vedly dlouholeté spory.

Zajímavosti o zvonech

Významní čeští zvonaři v minulosti:

Tomáš Jaroš (autor „Zpívající fontány“ v Královské zahradě Pražského hradu, odlil zvon Zikmund)

Vavřinec Kříčka z Bítvyšky (popsal postup návrhu a výroby zvonu)

Současní čeští zvonaři:

Petr Rudolf Manoušek, Zbraslav nad Vltavou

Marie Tomášková-Dytrychová, Brodek u Přerova

Josef Tkadlec, Halenkov

Nejstarší zvon v České republice:

Zvon z roku 1286, Městské muzeum Cheb

Největší český zvon:

Zikmund, Chrám sv. Víta, Praha, hmotnost se uvádí 13 500 kg až 16 000 kg

Opačně zavěšené zvony:

V Rovensku pod Troskami jsou tři zvony ze 17. století n. l. upevněny srdcem a jsou poháněny šlapáním.

Materiál zvonů:

Nejčastěji je to zvonovina, což je slitina mědi a cínu (22%SN, 78%Cu). Zvony se také odlévají z oceli, litiny, hliníku, zinku a dokonce ze stříbra. Někdy jsou i skleněné a porcelánové.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Kolaudace zvonů:

Probíhá podle „Směrnice pro kolaudaci zvonů“, která byla vydaná ministerstvem kultury a Národním památkovým ústavem (směrnice vychází z rozhodnutí Kampanologického sjezdu v Limburku v roce 1957). Pro zajímavost uvádíme tyto materiály v příloze č.2 (získány z <http://www.bcb.cz/index.php?a=dieceze&s=pamatky&t=limburske-smernice>).

Největší zvon světa:

Car Kolokol, Moskva, Rusko, 201 924 kg

Nejznámější zvon světa:

Liberty Bell (Zvon Svobody) v Filadelfii, symbol Pensilvánie a celých USA

Tradice odlévání zvonů ve Žďáře nad Sázavou

První dva zvony byly odlity ve Žďárských slévárnách a strojárnách při příležitosti zahájení výroby v srpnu roku **1951**. Byly odlity z **oceli na odlitky** a jeden z nich dodnes zvoní na zvonici kostela v obci **Křížánky**. Slévárny se k odlévání zvonů vrátily v roce 2001, kdy bylo odlito osm zvonů k výročí 50 let zahájení výroby ve firmě. Jeden z těchto zvonů byl **odlit i pro naši školu**. Od té doby se na základě požadavků obcí odlilo několik dalších zvonů. **Další zvon byl odlit v roce 2006 k výročí 55 výročí školy**. Oba naše zvony jsou zavěšeny ve vestibulu školy.



Obrázek 3 Fotografie školních zvonů

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

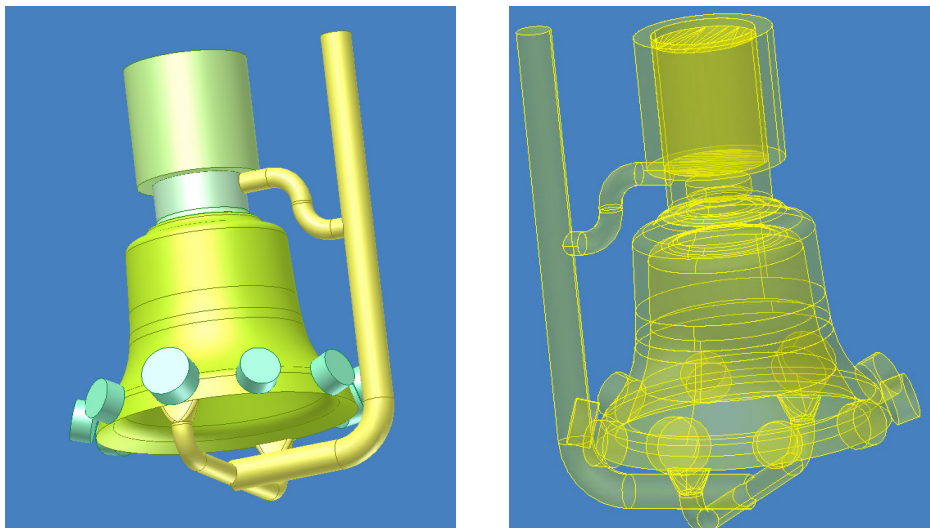
Návrh v CAD

Podle historických výkresů zvonů českého zvonáře Vavřince Kříčky z Bítvyšky, který žil v 16. století n. l., se v a. s. ŽĎAS navrhl tvar a velikost zvonu. Tento **3D model zvonu** byl vytvořen v programu **UNIGRAPHICS**. (obr. 4). Ke zvonu byla připojena vtoková soustava, systém chladítek a nálitek v hlavě zvonu (obr. 5)

Takto získaná **geometrická data** se využila nejen při vlastní výrobě polystyrénového modelu zvonu a jaderníku, ale také pro další počítačové simulace a výpočty. Proto nebylo potřeba kreslit a tisknout klasické výrobní výkresy.



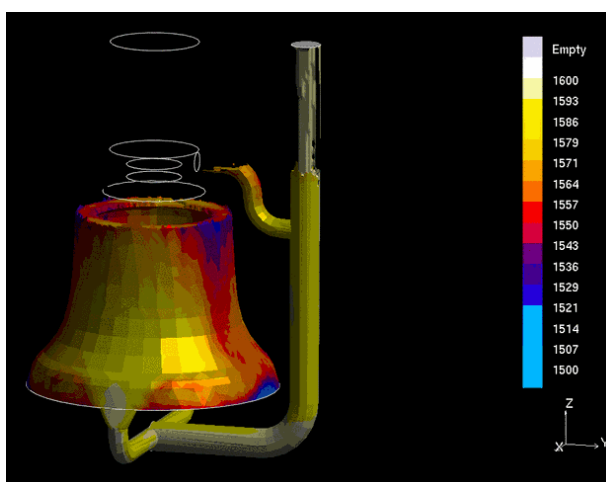
Obrázek 4 3D model zvonu



Obrázek 5 3D model surového odlitku

Počítačová simulace proudění

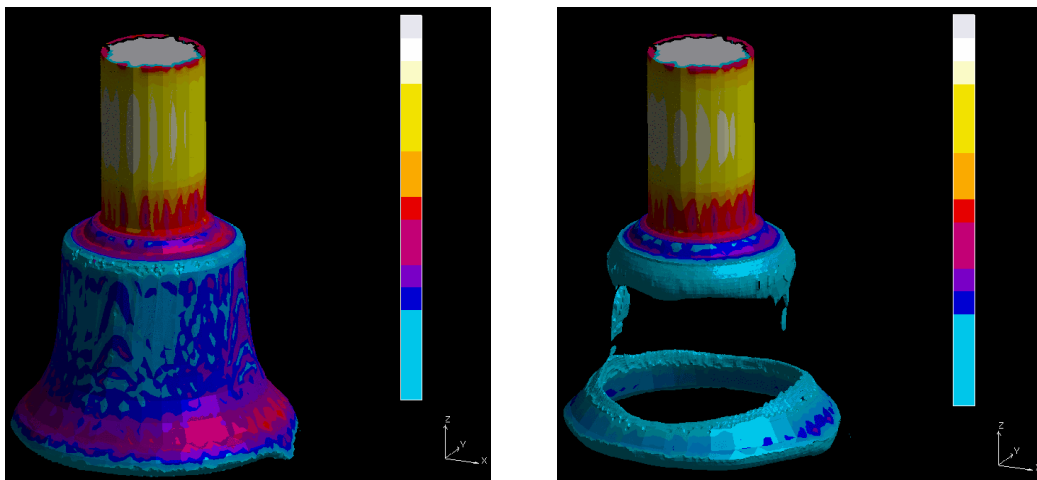
Při odlévání je třeba sledovat správné plnění formy – má být **klidné** a **usměrněné**. Takovým prouděním se docílí minimalizace špatných odlitků, vznikajících například z důvodu nezatečení, staženin apod. Proto se pro tuto simulaci nasazují výkonné počítačové programy. Simulace probíhá jako video a je možno podrobně sledovat podmínky plnění formy a případně **měnit vstupní parametry** lití (například rychlost plnění vtokového kanálu). Pro simulaci jsme využily software **MAGMASoft**. Z programu UNIGRAPHICS se přes formát STL přenesl 3D model včetně technologie do programu MAGMASoft. Po zadání materiálových hodnot (ocel na odlitky, její teplota při lití) a okrajových podmínek (rychlost plnění na začátku vtokové soustavy) se provedla simulace proudění oceli ve formě (obr. 6) Tato simulace je dostupná také jako videosnímek na www.spszr.cz a v elektronické příloze této práce.



Obrázek 6 Ukázka ze simulace plnění formy

Počítačová simulace chladnutí

Další významnou částí přípravy odlévání je simulace chladnutí odlitku ve formě. Touto simulací se posuzuje **rychlost chladnutí jednotlivých částí odlitku** a možnost vzniku vad (staženiny, řediny, zákalky apod.). Opět se mohou **měnit podmínky chladnutí** ještě před vlastním odléváním, například formovací materiál, počet a velikost chladítek atd. **U odlévání zvonů je doba chladnutí velmi důležitá**, protože při rychlém chladnutí, nebo předčasném vytažení zvonu z formy, může dojít k jeho **deformaci**, nebo **prasknutí**. Pro tuto simulaci se zase využil software **MAGMASoft**. Ukázka ze simulace chladnutí je na obr. 7. Opět je video dostupné na www.spszr.cz a v elektronické příloze této práce.



Obrázek 7 Simulace chladnutí zvonu na začátku a na konci

Popis technologie výroby zvonu

Výroba slévárenského modelu a jaderníku

Model zvonu se vyrobil soustružením, materiál modelu je **polystyrén**. Ten se po zaformování odstraní z formy vyřezáním po částech. Jaderník je dřevěný, slouží pro výrobu jádra, které tvoří dutinu zvonu.



Obrázek 8 Polystyrénový model zvonu

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Zaformování a odlévání

Model zvonu se zaformoval do formovací směsi chromitového písku pojeného fenolresolovou pryskyřicí novanol. Vytvrzování: CO₂ procesem. Složení oceli (%): C 0,16 - 0,19, Cu max. 0,35, Mn 0,60 - 0,80, Mo 0,95 - 1,05, Si 0,30 - 0,50, V max. 0,05, P max. 0,015, W max. 0,10, S max. 0,015, Al 0,02 - 0,03, Cr 2,10 - 2,35, Zr 0,02 - 0,04, Ni max. 0,50



Založení vtokové soustavy



Zasypávání chromitovým pískem



Vytvrzování pomocí CO₂



Vylamování modelu z formy



Pohled do vnitřku formy



Zvony po rozbití forem



Surový odlitek zvonu



Zvon s nálitkem, bez vtokové soustavy



Obrobený zvon

Počítačová analýza deformací a napětí

Naše škola zakoupila program pro řešení fyzikálních problémů metodou konečných prvků.

Tato metoda se označuje **MKP**, nebo **FEM**¹. **Pro řešení problému je třeba dobře znát jeho podstatu**, vlastní matematický popis a řešení problému nemusíme znát. Většinou se totiž řeší parciální diferenciální rovnice, které popisují problém.

Zakoupený program má název **COMSOL Multiphysics** (dříve **FEMLAB**), vyvíjí ho švédská firma COMSOL a v ČR ho prodává firma Humusoft Praha. Škola zakoupila COMSOL a dva moduly. Vlastní COMSOL řeší i proudění tekutin, moduly řeší vedení tepla a mechanické namáhání. Program se u nás vyučuje hlavně na Vyšší odborné škole, na Střední průmyslové škole se žáci s ním seznamují jen zběžně. Řešení úlohy pomocí MKP má tyto části:

- **vytvoření geometrie modelu** (nebo přenos těchto dat z 2D, popřípadě 3D modelu)
- **zadání fyzikálních vlastností prostředí** (materiál zvonu)
- **zadání okrajových podmínek úlohy** (působení úderu srdce do věnce zvonu a uchycení zvonu)
- **vytvoření sítě konečných prvků** (program provádí automaticky, nebo můžeme měnit)
- **nastavení a spuštění řešiče**
- **zobrazení výsledků a jejich vyhodnocování** (postprocessing)
- **případné změny v geometrii, nebo ve fyzikálních podmínkách a opakování postupu**

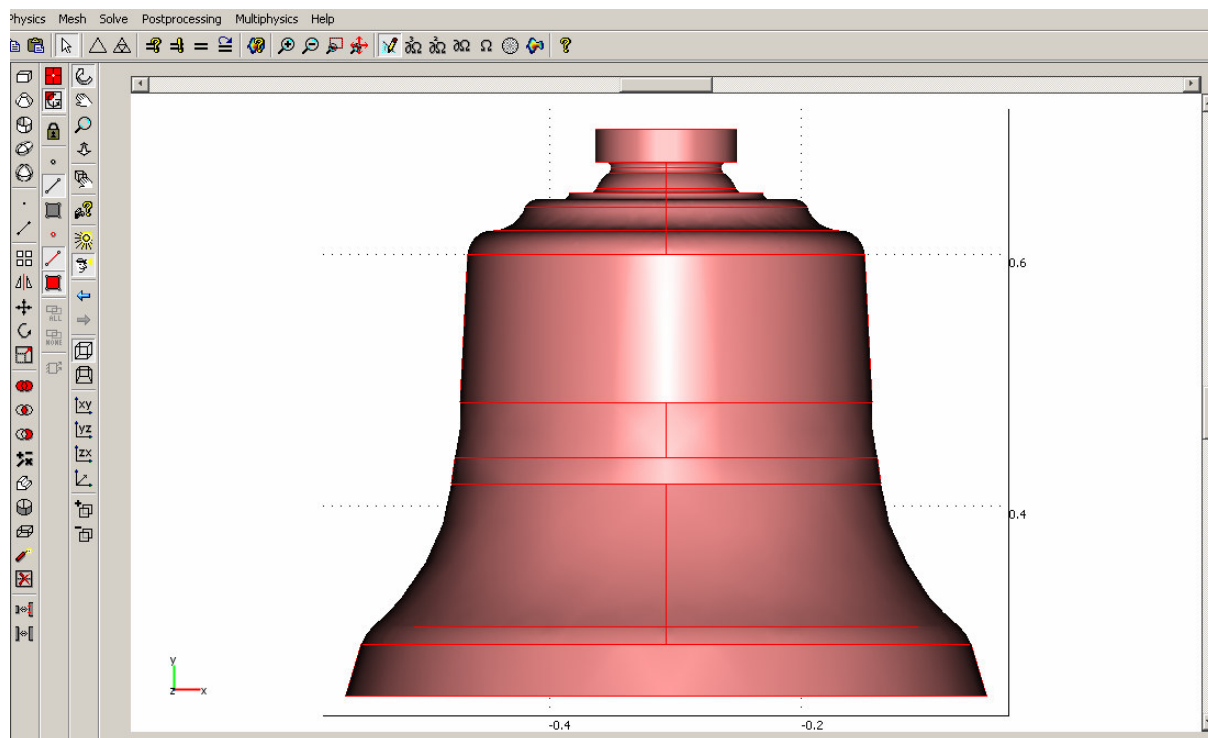
K jednotlivým částem analýzy deformací a napětí:

Vytvoření geometrie modelu

Jak bylo uvedeno, **3D model se vytvořil CAD programem UNIGRAPHICS**. Proto se tato **geometrická data přenesla do prostředí COMSOL** a model se zde nemusel znovu kreslit (prostředky pro kreslení v COMSOLu jsou mnohem horší než ve specializovaných CAD programech.). Výsledek je na obr. 9.

¹ FEM - Finite Elements Methode, metoda konečných prvků

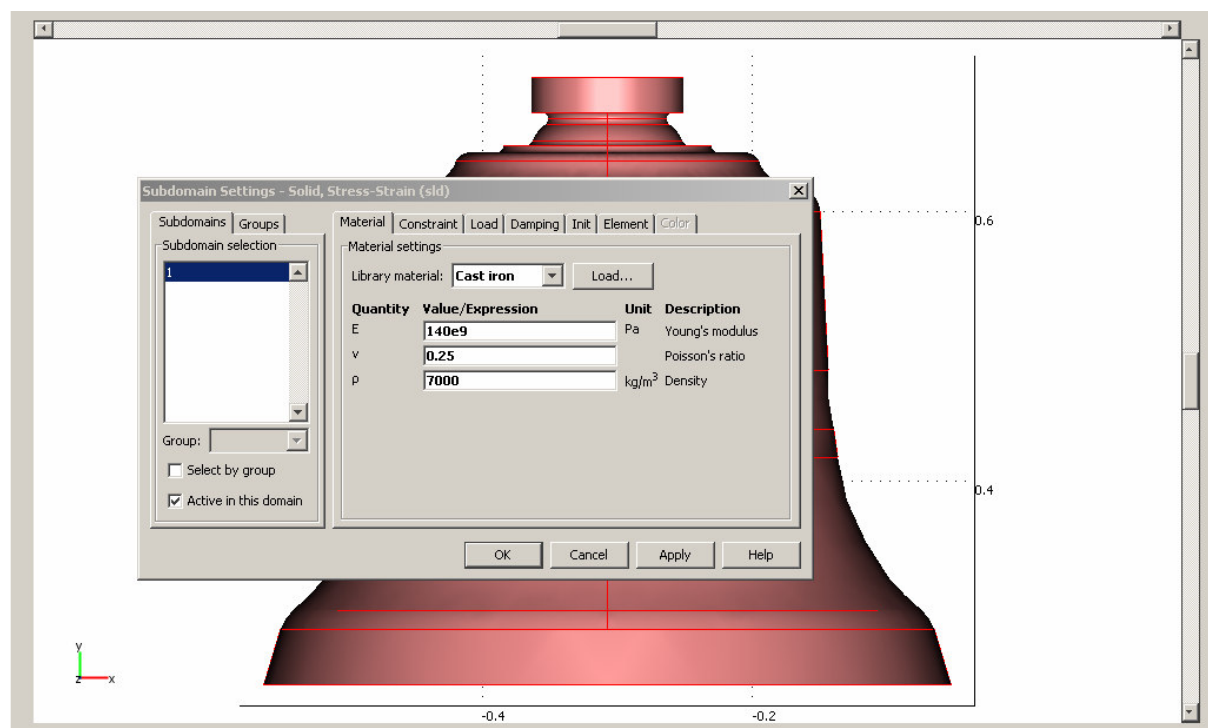
Stredoškolská odborná činnosť 2005/2006
Obor 09 – strojárstvo, hutníctví, doprava a priemyslový design



Obrázek 9 Import 3D geometrie do COMSOL

Zadání fyzikálních vlastností prostředí

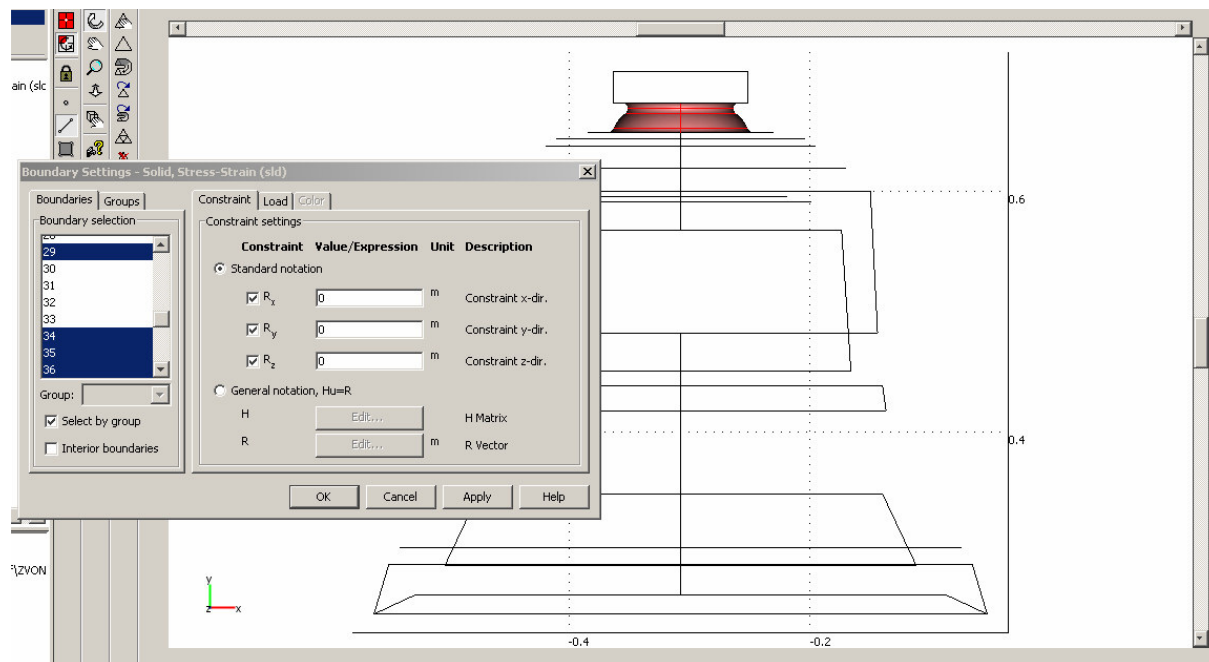
Uvedený zvon se v a. s. ŽĐAS odléval z oceli na odlitky. Preto se materiálové vlastnosti potrebné pro výpočet načety z **database materiálu**, která je obsažena v programu COMSOL.



Obrázek 10 Zadání materiálových vlastností

Zadání okrajových podmínek úlohy

Dalším krokem je zadání okrajových podmínek pro řešení úlohy. První okrajovou podmínkou bude zadání **uchycení zvonu**. V našem případě se pevně uchycuje za krček pod korunou a proto se musí v této části zadat nulový posuv příslušných ploch ve směru os **x**, **y** a **z**. Zadání je zřejmé z obrázku 11.



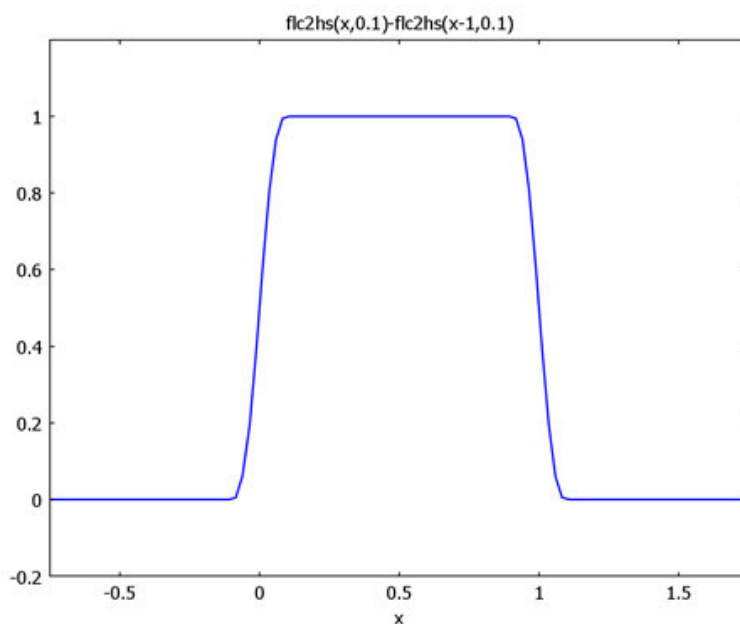
Obrázek 11 První okrajová podmínka – uchycení za krček

Jako další okrajovou podmínku musíme zadat **silové působení srdce zvonu na věnec zvonu při zvonění**. Zde jsme měřením zjistily poměr vodorovné složky a svislé složky působící síly 40:18 (viz obr. 12). Proto tyto síly byly zadány v uvedeném poměru, který zajistí působení síly šikmo vzhůru pod požadovaným úhlem. Složky síly byly ve směru osy **z** 800 N a ve směru osy **y** 360 N. Výsledná síla působí prakticky bodově (ploška cca 5 x 5 mm), proto také byla nasazena pomocí položky Point Settings do příslušného bodu na věnci zvonu (viz obr. 13 červený bod) Doba dynamického působení síly byla odhadnuta na 0,2 sekundy. Pro takové krátké působení se využila Heavisidova funkce, kterou program COMSOL zná. Tato funkce má tvar **flc2hs(x,scale)** a představuje náběh z funkční hodnoty 0 na funkční hodnotu 1. Je to tedy typická skoková funkce, která ale nemá tak ostré přechody jako klasická skoková funkce. Argument **x** je čas, argument **scale** je parametr náběhu. Jestliže potřebujeme aby síla začala působit v čase **t=0** a pominula v čase **t=0,2** sec, použijeme dvě uvedené funkce s opačným znaménkem a jedna bude posunuta v čase o 0,2 sekundy. Zápis bude vypadat takto:

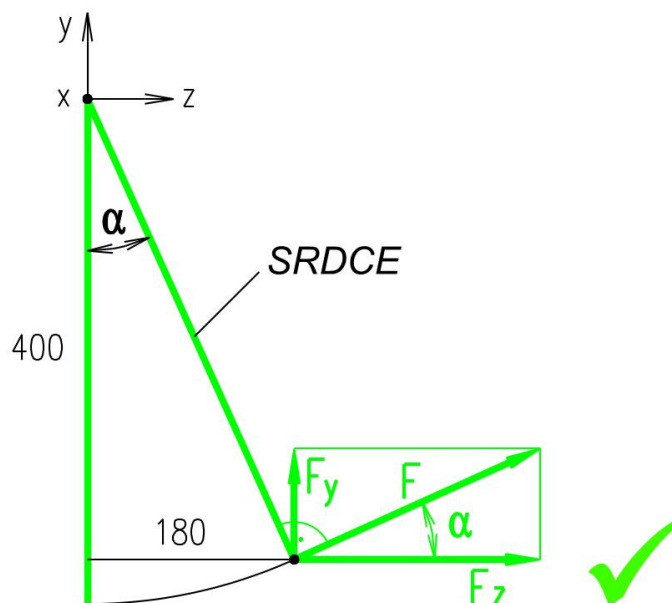
$$\mathbf{flc2hs}(t,0.1)-\mathbf{flc2hs}(t-0.2,0.1)$$

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

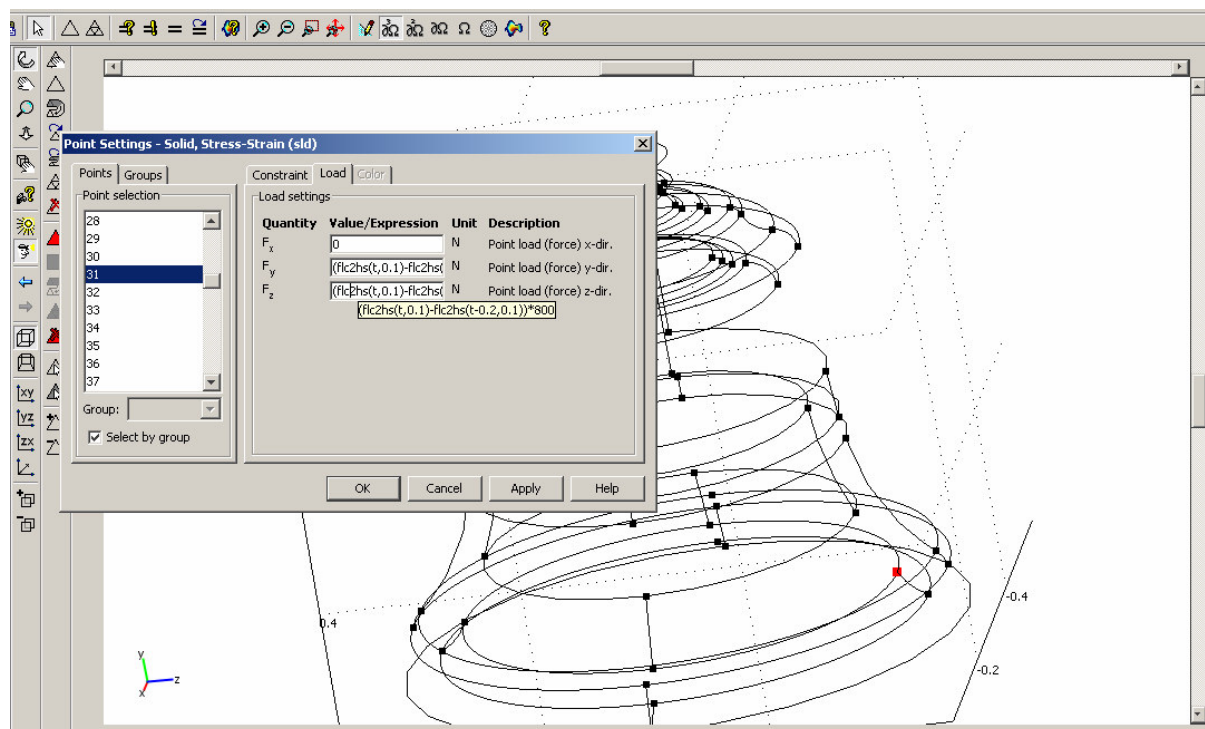
Grafické znázornění například pro dobu působení **1 sekundy** je:



Po přenásobení uvedeného výrazu složeného ze dvojice opačných Heavisidových funkcí velikostí složky ve směru osy z (vodorovná – viz obr. 12) a velikostí složky ve směru y (svislá – viz obr. 12) získáme požadované dynamické působení síly – úder srdce do věnce.



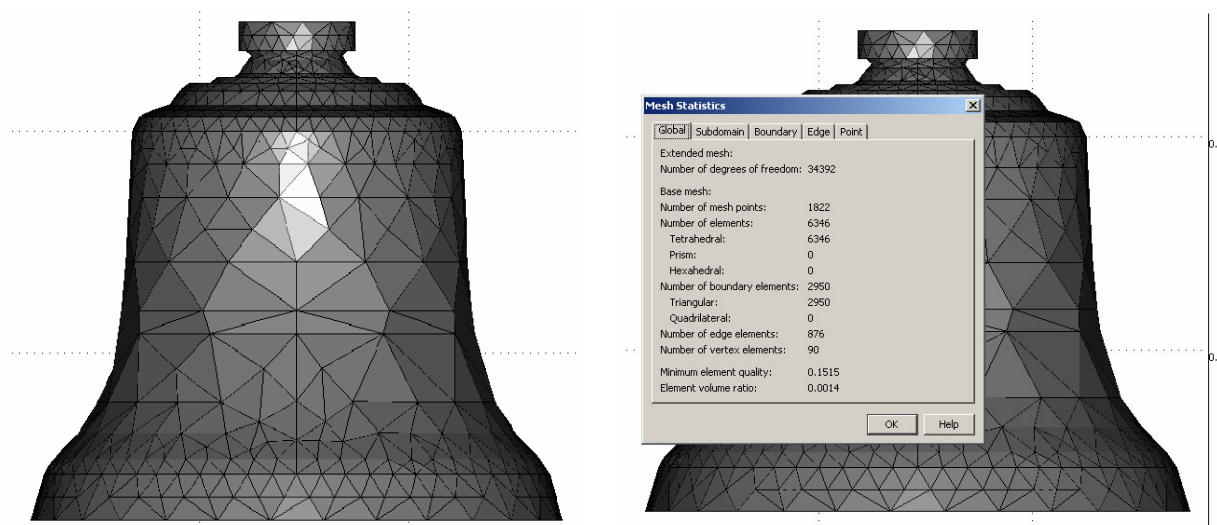
Obrázek 12 Rozklad síly při úderu srdce do věnce zvonu



Obrázek 13 Zadání dynamické síly do bodu na věnci zvonu

Vytvoření sítě konečných prvků

Pro výpočet je třeba **vygenerovat síť konečných prvků**. Síť nesmí být hrubá, to by mohlo vést k nepřesnému výsledku, nebo by program výsledek ani nespočetl. Pokud síť bude příliš jemná, bude úloha rozsáhlá a její řešení bude buď časově náročné (hodiny), nebo na takové řešení nebude stačit hardware počítače – například velikost operační paměti. Z tohoto důvodu jsme ponechaly generování sítě na softwaru a síť se vygenerovala automaticky. I takovou síť lze následně editovat. Pro posouzení velikosti sítě a velikosti úlohy se využije statistika sítě.



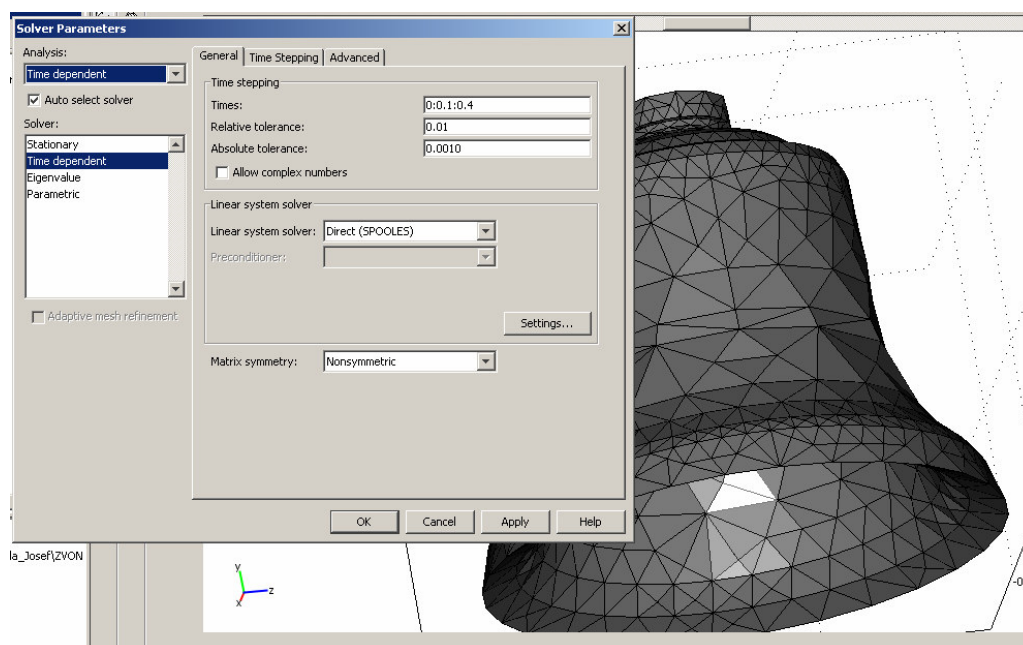
Obrázek 14 Síť a její statistika

Středoškolská odborná činnost 2005/2006 Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Naše úloha má tedy **6346 elementů** a její velikost je **34392 stupňů volnosti** (Number of degrees of freedom, DOF).

Nastavení a spuštění řešiče

Dalším krokem je **nastavení řešiče**. Je zde třeba znát dobře podstatu řešené úlohy a vhodně vybrat (třeba po konzultaci s odborníkem v dané oblasti) řešič. Řešiče jsou přiřazeny podle typu úlohy. Úloha může být **statická**, nebo **časově proměnná**. V našem případě se jedná **zcela určitě o snahu řešit úlohu jako dynamickou**, vždyť působení síly jsme zadávaly také dynamicky. Proto vybereme řešič **Time dependent** a nastavíme dobu řešení na **0,4 sekundy** s krokem 0,1 sekundy. Řešení se tedy bude počítat pro časy 0 – 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 sekundy. Tato řešení se potom i uplatní při generování videa pro vývoj deformací.

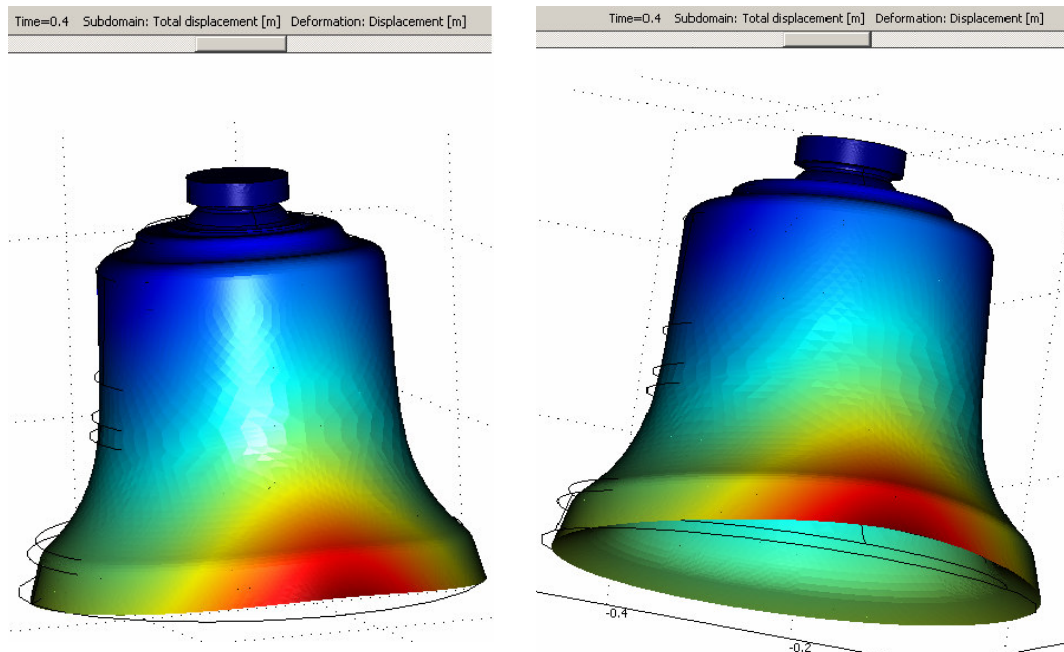


Obrázek 15 Výběr a nastavení řešiče

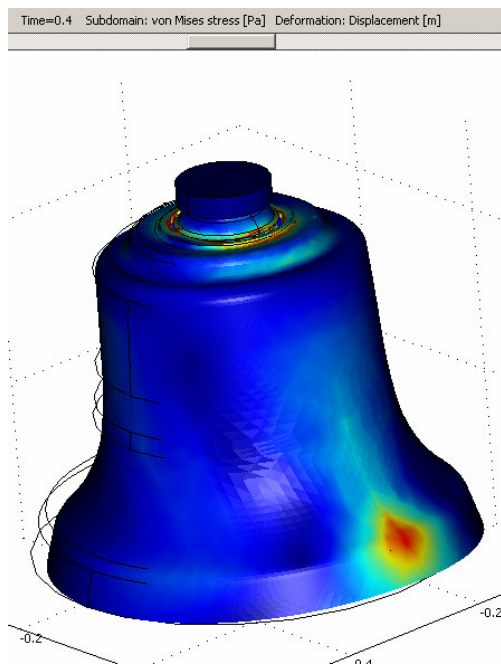
Zobrazení výsledků

Po spuštění řešiče se čeká na výsledek. To může trvat **od několika málo sekund až po několik hodin**. V praxi se řeší i obrovské úlohy na výkonném hardwaru i několik desítek hodin. Tato úloha trvala **desítky sekund** na PC (Pentium 4,3 GHz, 3 GB RAM). Dále uvedené úlohy pro analýzu vlastních frekvencí a tvarů trvaly i několik desítek minut. Po vyřešení úlohy dostáváme barevně zobrazené hodnoty deformací a napětí. Viz obr. 16 až 18.

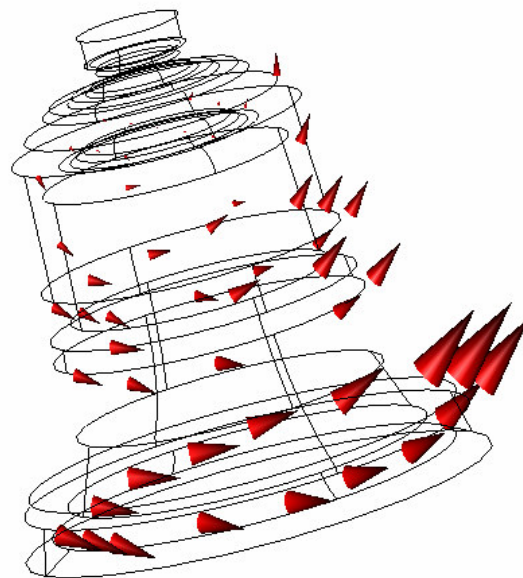
Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design



Obrázek 16 Zobrazení celkové deformace zvonu ve dvou pohledech



Obrázek 17 Zobrazení napětí



Obrázek 18 Šipky směru hlavní deformace

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Vyhodnocování výsledků a diskuze

Výsledkem řešení nejsou jen obrázky, které jsou hezké a barevné. Tato zobrazení se musí podrobně vyhodnotit. Musíme si klást následující otázky:

- je to řešení, které se i předpokládalo?
- je to pravděpodobně správné řešení?
- není v řešení zjevná chyba?
- pokud dojdeme k závěru, že řešení je správné, klademe si otázku:
 - o jaké jsou závěry z vyhodnocení řešení?

Závěrem může být konstatování, že součást je v pořádku, není třeba dělat žádná opatření. Může ale také být závěrem návrh na ubrání, nebo přidání materiálu, na změnu materiálu, na změnu konstrukce. Pokud uvedené výpočty nedělá přímo konstruktér, ale výpočtář, musí se návrhy navzájem konzultovat a výpočet po změnách provést třeba i znovu.

U našeho příkladu můžeme konstatovat:

Naše úloha nebyla zadána na zjištění konkrétních deformací a napětí při konkrétním používání zvonu. Úloha měla **popsat postup řešení** a zjistit, zda je takové řešení reálné. Tato možnost byla prokázána a případný návrhář a výrobce zvonu může uvedený postup plně použít. Tím si **virtuálně v počítači nasimuluje CAD návrh zvonu, proudění ve slévárenské formě, chlazení zvonu ve formě, dynamické namáhání zvonu a vznikající deformace a napětí a také vlastní frekvence zvonu.** To jsou vše moderní technologie, které současný zvonař moc nepoužívá, stále věří postupům, které jsou založeny na zkušenostech. Pokud by ale tyto počítačové simulace využíval, výroba zvonů by se jistě stala **rychlejší a kvalitnější.** Nemuselo by se dávat doporučení – po 150 letech zvonění pootočit zvon do jiné polohy, aby srdce nevytlouklo věnec zvonu a ten nepraskl. Stejně metody by se daly použít i pro výrobu srdce (místo odlévání by zde byly návrhy na jeho vykování) a pokud by se použily výpočty pro únavu materiálu, nemuselo by dojít ke zlomení srdce u zvonu Zikmund v katedrále Sv. Víta v Praze (rok 2002), což byl vyloženě únavový lom (viz obr. 19).



Obrázek 19 Lom srdce zvonu Zikmund

Komentář k zobrazení deformací:

Výsledek je možno zobrazovat v **mnoha zobrazeních a polohách zvonu**. Je dobře patrný **tvar zdeformovaného zvonu** během úderu. Přechod mezi jednotlivými tvary během úderu a po něm se může zobrazit jako **videosnímek**. Je také možné jednoduše zjistit maximální deformaci, nebo deformace ve směru jednotlivých os. Videosnímky jsou uvedeny v elektronické příloze práce.

Komentář k zobrazení napětí:

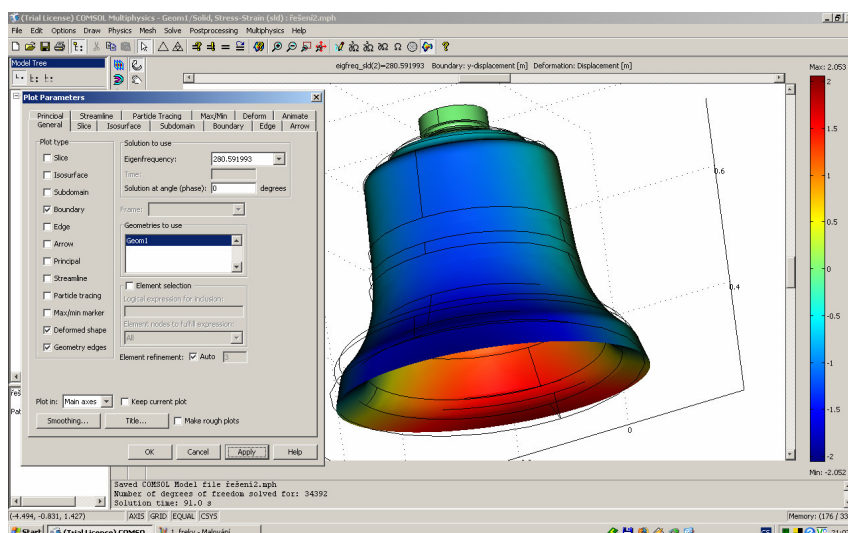
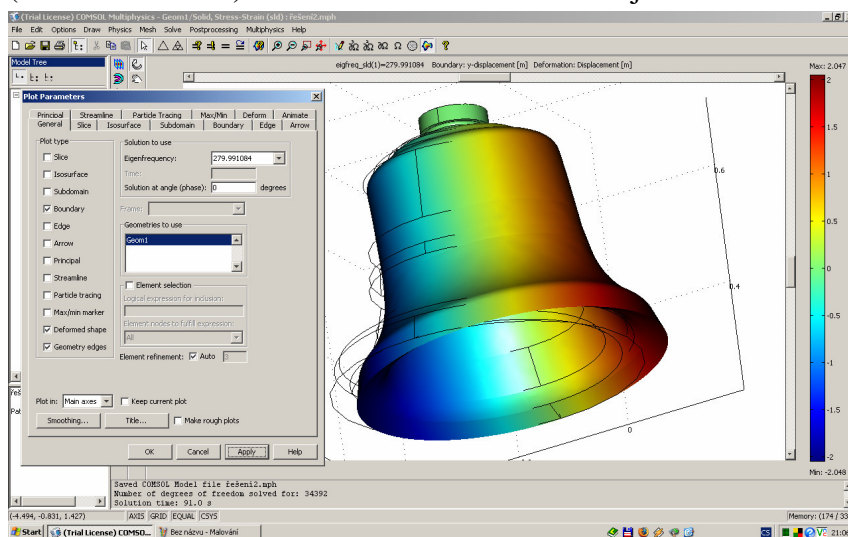
V obrázku 17 je zachyceno celkové napětí počítané jako **von Misses stress**. Viditelná je oblast úderu srdce na zvon. Další zatíženou oblastí s maximálním napětím je **oblast pod uchycením krčku zvonu**. Zvony bývají ale uchyceny i jiným způsobem, potom by samozřejmě byly i odlišné výsledky. V případě skutečného (praktického) výpočtu **by se napětí porovnávalo s napětím na mezi kluzu, nebo s dovoleným napětím**. U našeho materiálu (ocel) je mnohem nižší než napětí na mezi kluzu použité oceli a proto není významné. Běžným materiálem zvonů je ale zvonovina (22 % Sn, 78 % Cu) a materiálové vlastnosti by byly úplně jiné (a také výsledky výpočtů). Obdobně jako u srdce zvonu by se mohl plášť zvonu počítat na únavu materiálu.

Akustická analýza – výpočet vlastních frekvencí a tvarů (FEM)

Dalším návrhem pro pokračování projektu bylo **zjištění vlastních frekvencí zvonu**.

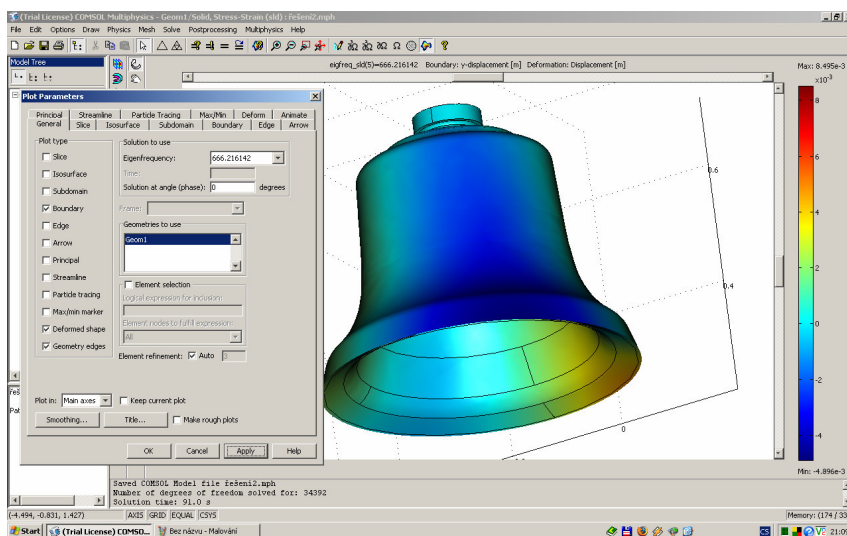
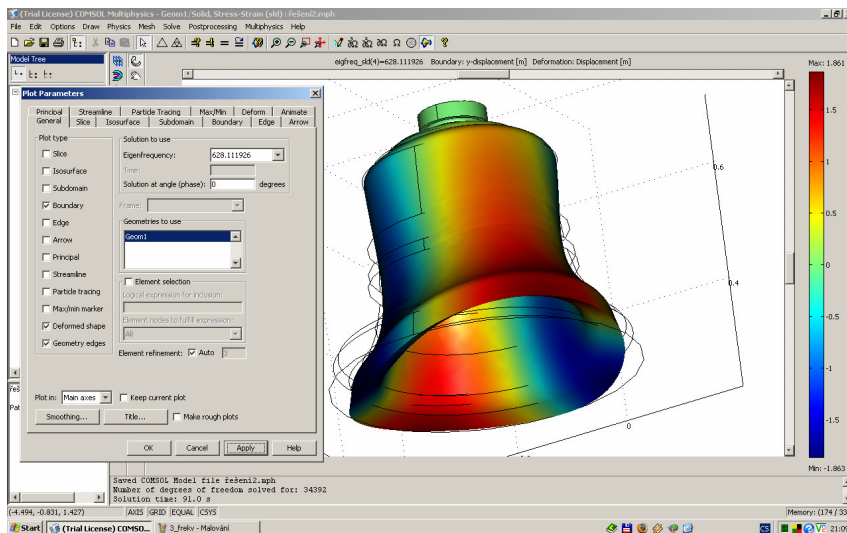
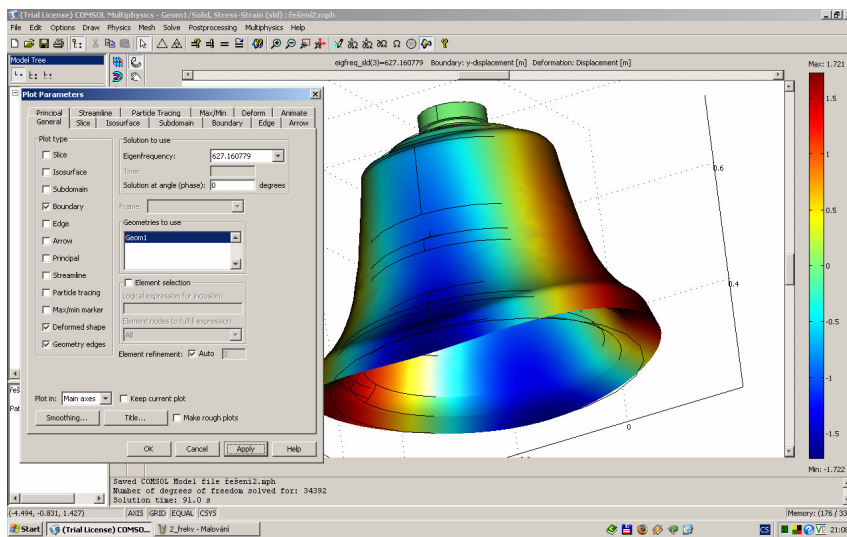
V programu COMSOL Multiphysics je možno počítat vlastní frekvence a tvary součástí. To je zejména důležité pro **periodicky zatěžované součásti a sestavy**. Pokud taková součást se dostane zatěžováním do vlastní frekvence (těch frekvencí bývá víc), roste její amplituda teoreticky do nekonečna a ještě předtím dojde k jejímu poškození. Obecně známým příkladem jsou **vlastní frekvence mostu**. Pokud by se takový most periodicky zatěžoval s frekvencí stejnou jako je jeho vlastní frekvence, dojde k jeho destrukci. Proto se vždy uvádí, že vojáci mají na mostě zrušit krok, aby se náhodou nedostalo jejich zatěžování do vlastní frekvence mostu.

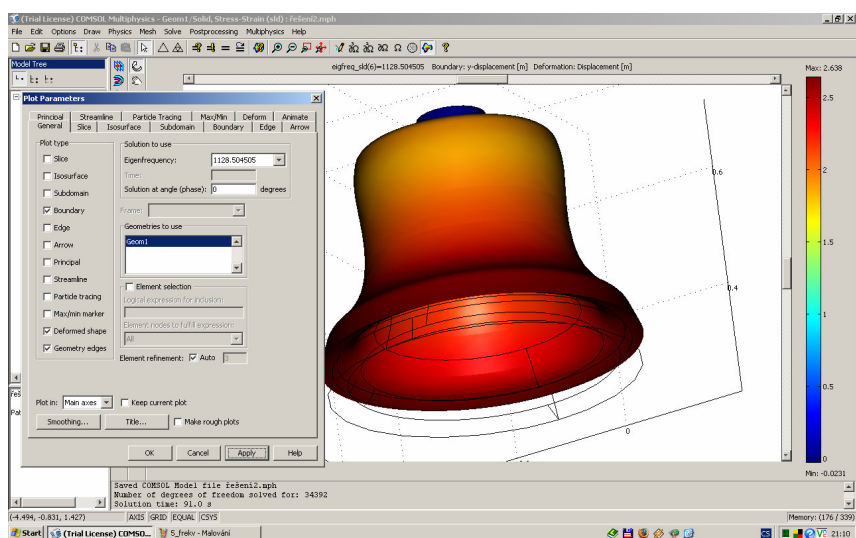
I když **zvon není asi typickou součástí pro takové zjišťování**, přesto jsme zkusily popsaný výpočet. Pro výpočet se v programu COMSOL musí použít specializovaný modul Acoustics a zvolit řešič Eigenfrequency. V řešiči nastavíme počet požadovaných vlastních frekvencí. Výsledkem jsou **nejen frekvence vlastních kmitů, ale také tvary zvonu při takových frekvencích** (viz obr. 20 až 25). Viseosnímek vlastních tvarů je v elektronické příloze práce.



Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design





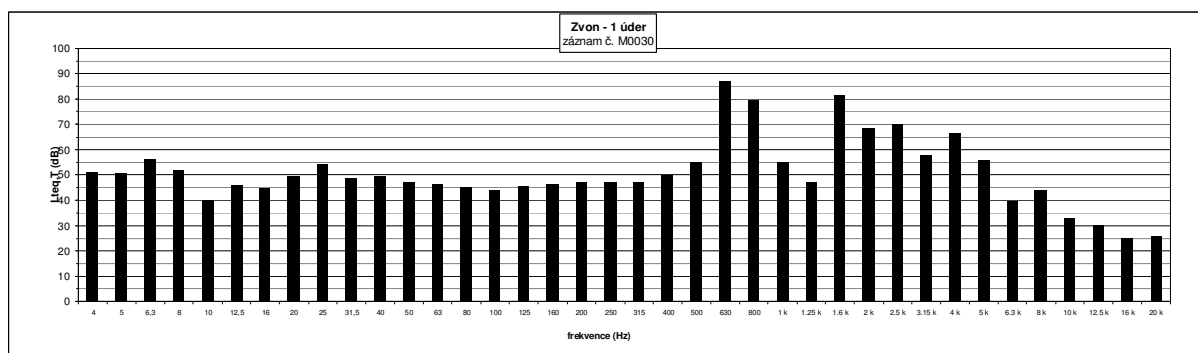
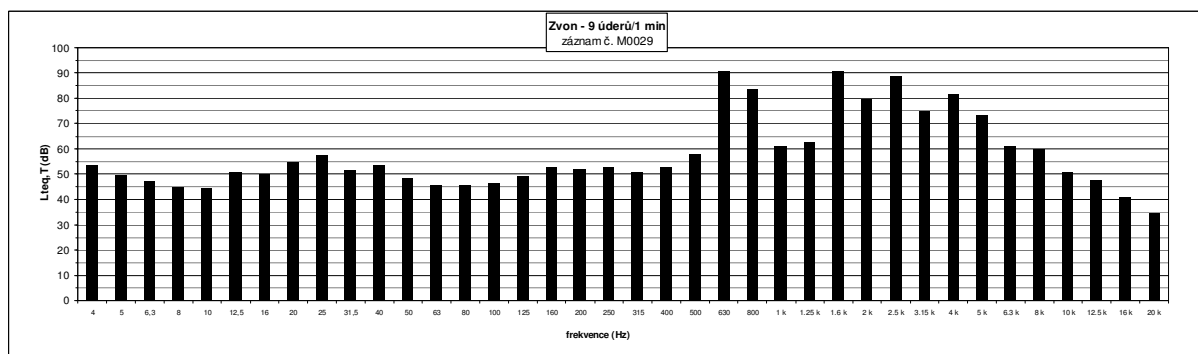
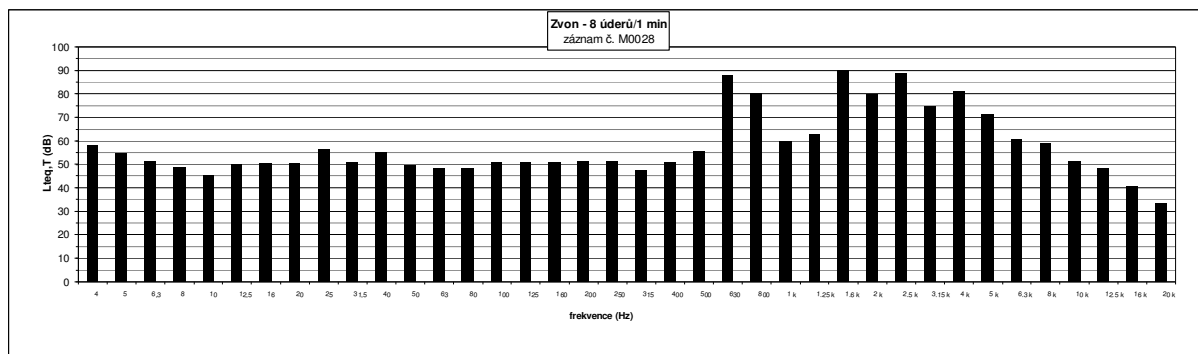
Obrázky 20 až 25 Tvary zvonu při vlastních frekvencích

Měření akustiky zvonu – frekvenční analýza

Poslední částí našeho projektu je **akustika zvonu**. Je to také poslední etapa ve výrobě, kdy zvonař při provizorním zavěšení zvonu zkouší, jak se mu zvon podařilo vyrobit – tedy jaký má tón. Čistota zvuku je důležitá zejména ve zvonkohrách, ale také jednotlivě provozovaný zvon musí mít požadovaný zvuk. **Největší vliv na zvuk zvonu má jeho konstrukční návrh**, což je nejen hmotnost zvonu a jeho hlavní rozměry, ale zejména tvar žebra zvonu (profil stěny). Tyto výpočty si každý zvonař chrání jako své know-how.

Zde jsme měřily zvuk vydávaný zvonem. Protože škola vlastní pouze hlukoměr, který měří jen úroveň konstantního hluku bez možnosti dalšího rozboru, navázaly jsme kontakt s pobočkou Zdravotního ústavu ve Žďáře nad Sázavou, kde mají **frekvenční analyzátor** v ceně cca 500 000 Kč. Pracovnice tohoto ústavu k nám do školy ochotně zajela a přístrojem **Norsonic SA 110** zaznamenala zvuk zvonu po úderu srdcem. Při měření byl použit mikrofon BK 4189 a kalibrátor BK 4231. Mikrofon jsme umístily asi do poloviny výšky pláště zvonu a do vzdálenosti 800 mm od pláště zvonu. Záznamy zvuku se provedly **pro jeden úder, pro 8 úderů za minutu a pro 9 úderů za minutu**. Po jednotlivých úderech se data načítala a výsledkem byly následující tři grafy (viz obr.26).

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design



Obrázek 26 Grafy z frekvenční analýzy zvuku zvonu

Průběh těchto grafů je navzájem velmi podobný. Zvon vydává celé spektrum tónů (frekvencí), některé frekvence jsou ale významější. Jsou to:

630 800 1600 2000 2500 4000 Hz

Hodnocení zvukových vlastností zvonu je ale složitou záležitostí a musí ho podle směrnic (viz příloha č.2) provést zkušený kampanolog.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Závěr

Práce nám umožnila **seznámit se s problematikou simulačních výpočtů** založených zejména na metodách **MKP (FEM)**. **Velmi zajímavé bylo používat tyto moderní počítačové metody na výrobek, který lidstvo zná víc než tisíc let** a který se prakticky nemění ani materiálově, ani tvarově. Seznámily jsme se s programem **COMSOL Multiphysics**, který je možno použít pro řešení fyzikálních úloh v řadě oblastí. Práce nám pomohla **pospojovat některé dílčí znalosti z výuky do celku, zvýšila naši schopnost samostatně řešit problémy a seznámila nás s některými postupy a technikami, se kterými bychom asi nikdy nepřišli do styku** (například frekvenční analýza, simulace pomocí MKP). Jako doplnění práce jsme provedly frekvenční analýzu a další měření zvonu.

Výsledky práce můžeme shrnout do následujících bodů:

- **návrh geometrie zvonu pomocí CAD**
- **počítačová simulace odlévání zvonu**
- **počítačová simulace chlazení zvonu**
- **popis technologie výroby zvonu v moderní slévárně**
- **výpočet napětí a deformací pomocí MKP**
- **výpočet vlastních frekvencí a tvarů**
- **frekvenční analýza zvuku zvonu**

Ve Žďáře nad Sázavou 23.3.2007

Aneta Neubauerová, Jana Hejlová

Seznam použité literatury

- [1] MANOUŠEK, Petr. Zvonařství. Praha: Grada Publishing, 2006.
ISBN 80-247-1294-6.
- [2] Internetové zdroje
www.comsol.com
www.humusoft.cz
www.bcb.cz/index.php?a=dieceze&s=pamatky&t=limburske-smernice
- [3] Dokumentace k uvedenému softwaru (Unigraphics, MAGMAsoft, COMSOL Multiphysics)

Příklad vygenerované zprávy výpočtu v programu COMSOL Multiphysics

COMSOL Model Report

1. Table of Contents

- Title - COMSOL Model Report
 - Table of Contents
 - Model Properties
 - Geometry
 - Geom1
- Materials/Coefficients Library
 - Solver Settings
 - Postprocessing
 - Variables

2. Model Properties

Property	Value
Model name	
Author	
Company	
Department	
Reference	
URL	
Saved date	Mar 2, 2007 5:00:43 PM
Creation date	Jan 10, 2007 4:14:59 PM
COMSOL version	COMSOL 3.2.0.222

File name: L:\SOČ_zvon\řešení_škola_time\řešení_škola_časově.mph

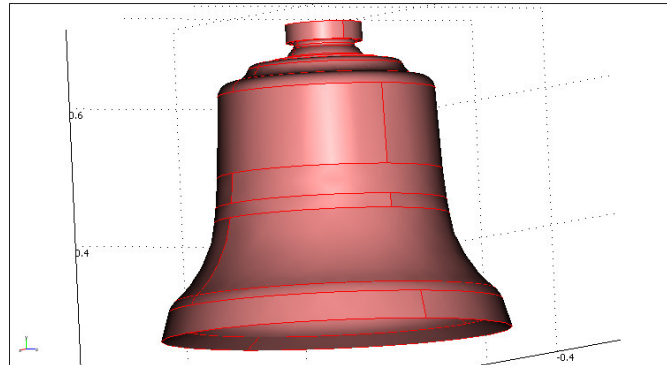
Application modes and modules used in this model:

- Geom1 (3D)
 - Solid, Stress-Strain

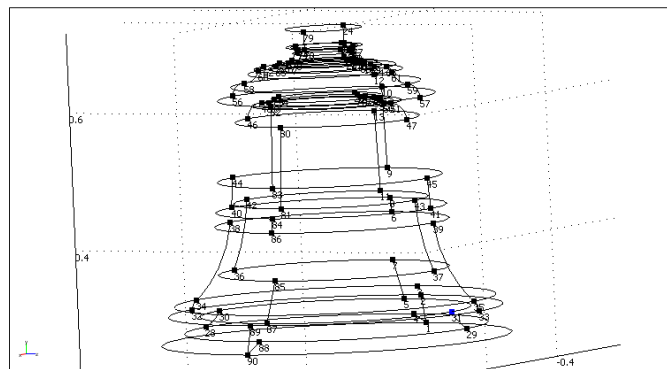
3. Geometry

Number of geometries: 1

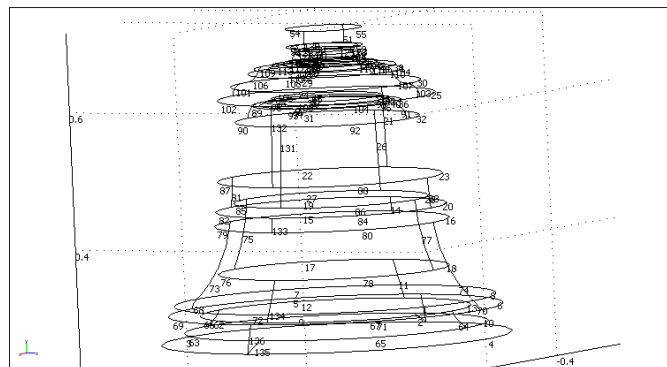
3.1. Geom1



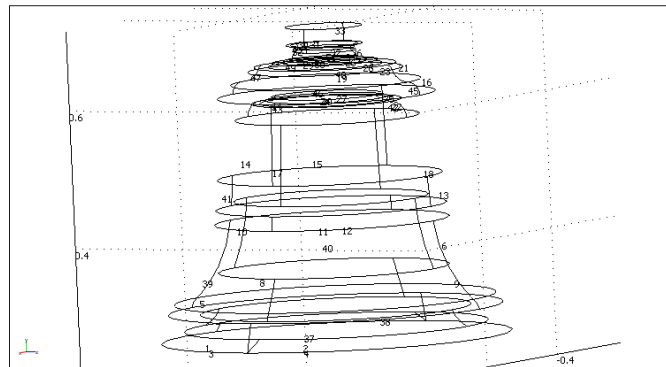
3.1.1. Point mode



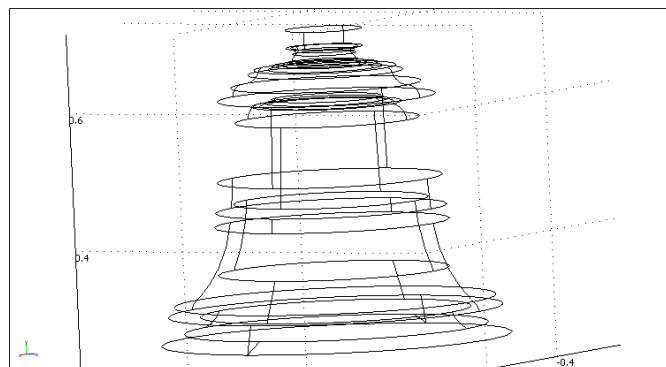
3.1.2. Edge mode



3.1.3. Boundary mode



3.1.4. Subdomain mode



4. Geom1

Space dimensions: 3D

Independent variables: x, y, z

4.1. Mesh

4.1.1. Mesh Parameters

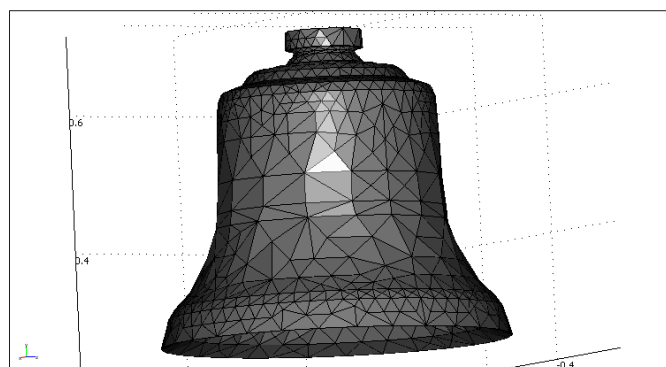
Parameter	Value
Maximum element size	
Maximum element size scaling factor	1.9
Mesh curvature factor	0.8
Element growth rate	1.7
Mesh curvature cut off	0.05
Resolution of narrow regions	0.3

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Resolution of geometry	20
x-direction scale factor	1.0
y-direction scale factor	1.0
z-direction scale factor	1.0
Optimize quality	On
Mesh geometry to level	Subdomain
Subdomain	
	1
Maximum element size	
Element growth rate	
Boundary	
	1-52
Maximum element size	
Element growth rate	
Mesh curvature factor	
Mesh curvature cut off	
Edge	
	1-136
Maximum element size	
Element growth rate	
Mesh curvature factor	
Mesh curvature cut off	
Point	
	1-90
Maximum element size	
Element growth rate	

4.1.2. Mesh Statistics

Number of degrees of freedom	34923
Number of edge elements	893
Number of boundary elements	3020
Number of elements	6432
Minimum element quality	0.2084



Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

4.2. Application Mode: Solid, Stress-Strain (sld)

Application mode type: Solid, Stress-Strain

Application mode name: sld

4.2.1. Application Mode Properties

Property	Value
Default element type	Lagrange - Quadratic
Analysis type	Time dependent
Specify eigenvalues using	Eigenfrequency
Frame	Reference frame
Weak constraints	Off

4.2.2. Variables

Dependent variables: u, v, w

Shape functions: shlag(2,'u'), shlag(2,'v'), shlag(2,'w')

Interior boundaries not active

4.2.3. Point Settings

Point	1-30, 32-90	31
Point load (force) y-dir. (Fy)	N 0	'(flc2hs(t,0.1)-flc2hs(t-0.2,0.1))*360'
Point load (force) z-dir. (Fz)	N 0	'(flc2hs(t,0.1)-flc2hs(t-0.2,0.1))*800'
style	1 {0,{0,0,0}}	{0,{0,0,255}}

4.2.4. Boundary Settings

Boundary	1-33, 37-49	34-36, 50-52
Hx	1 0	1
Hy	1 0	1
Hz	1 0	1

4.2.5. Subdomain Settings

The subdomain settings only contain default values.

5. Materials/Coefficients Library

5.1. Cast iron

Parameter	Value
Young's modulus (E)	140e9
Thermal expansion coeff. (alpha)	11e-6
Poisson's ratio (nu)	0.25
Density (rho)	7000

5.2. Cast iron

Parameter	Value
Young's modulus (E)	140e9
Thermal expansion coeff. (alpha)	11e-6
Poisson's ratio (nu)	0.25
Density (rho)	7000

5.3. Cast iron

Parameter	Value
Young's modulus (E)	140e9
Thermal expansion coeff. (alpha)	11e-6
Poisson's ratio (nu)	0.25
Density (rho)	7000

6. Solver Settings

Solve using a script: off

Analysis type	Time_dependent
Auto select solver	On
Solver	Time dependent
Solution form	Automatic
Symmetric	On
Adaption	Off

6.1. Direct (SPOOLES)

Solver type: Linear system solver

Parameter	Value
Pivot threshold	0.1
Preordering algorithm	Minimum degree

6.2. Time Stepping

Parameter	Value
Times	0:0.1:0.4
Relative tolerance	0.01
Absolute tolerance	0.0010
Times to store in output	Specified times
Time steps taken by solver	Free
Manual tuning of step size	Off
Initial time step	0.0010
Maximum time step	1.0
Maximum BDF order	5

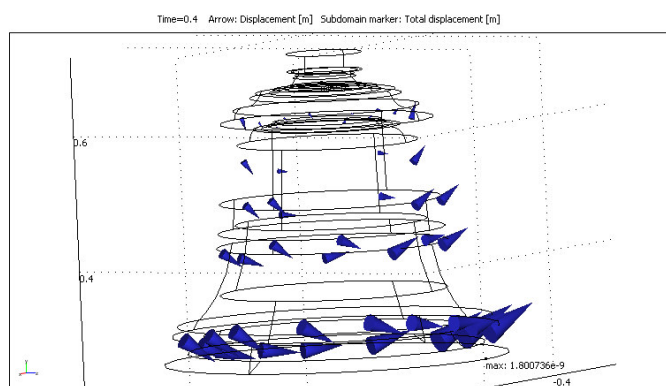
Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Singular mass matrix	Maybe
Consistent initialization of DAE systems	Off
Error estimation strategy	Include algebraic
Allow complex numbers	Off

6.3. Advanced

Parameter	Value
Constraint handling method	Elimination
Null-space function	Automatic
Assembly block size	5000
Use Hermitian transpose of constraint matrix	Off
Use complex functions with real input	Off
Type of scaling	Automatic
Manual scaling	
Row equilibration	On
Manual control of reassembly	Off
Load constant	On
Constraint constant	On
Mass constant	On
Damping (mass) constant	On
Jacobian constant	On
Constraint Jacobian constant	On

7. Postprocessing



Předpisy z oblasti zvonařství

Pro doplnění uvádíme některé předpisy týkající se zvonů. Jsou to:

- 1) Limburské směrnice – pro posuzování nových zvonů
- 2) Ochrana starých zvonů a uměleckých památek
- 3) Nové zvony a péče o staré zvonařské památky
- 4) Péče o zvony (interní norma České biskupské konference)
- 5) Restaurování zvonů (německá směrnice)
- 6) Základní směrnice pro kolaudaci zvonu

Pro naši práci zajímavé pasáže jsou podtrženy.

Limburské směrnice pro posuzování zvuku zvonů¹

¹ Naposledy publikovány ve sborníku *Glocken in Geschichte und Gegenwart. Beiträge zur Glockenkunde* (1971–1985), ed. Kurt Kramer, Karlsruhe 1986, s. 263–268. Tyto podrobné směrnice vzešly ze dvou setkání odborníků v německém městě Limburg (6.–9. 11. 1950 a 6.–9. 6. 1951), protože tzv. Frankfurtské teze z roku 1927 sestavené Peterem Griesbacherem již nebyly dostačující. Viz zvl. Theo Fehn, *Der Glockenexperte. Band 1. Vom Neuaufbau des deutschen Glockenwesens aus der Sicht von Theo Fehn*, Karlsruhe 1991, s. 174–187; a dále druhý díl téže knihy, *Blick hinter die Kulissen*, Karlsruhe 1992, s. 337–338, 408–410 a 411–415.

Estetické oceňování uměleckého díla podle nějakých pravidel je vždy pochybné. Tato pravidla obvykle směřují k rozboru, který odhaluje jen to povrchní a narušuje přitom souvislosti a vlastní život díla. Na umělecké dílo je nutno pohlížet jako na dílo celistvé a živoucí a jako takové musí být hodnoceno a vnímáno všemi smysly. Proto je také náš úsudek vždy do určité míry subjektivní.

V tomto smyslu chtějí být pojaty a interpretovány následující směrnice; analytický obraz proto zpravidla jenom potvrdí a objasní bezprostřední a živý sluchový dojem.

I. Zvon

A. Stavba zvuku

Pro zvukovou analýzu je jako normální ladění stanoveno pařížské ladění $a' = 435$ hertz (= dvojitých kmitů za sekundu). Odchyly od normální výšky tónu se udávají v šestnáctinách půltónu.

Stavba zvuku zvonu se člení na principálovou a mixturovou oblast. Dobrý zvon v principálové oblasti vyžaduje:

1. jednoznačný nárazový tón. Je to hlavní tón, k němuž se vztahují všechny ostatní tóny;
2. shodu nárazového tónu a primy;
3. čistou spodní oktávu;

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

4. čistou horní oktávu;
5. jednoznačnou mollovou tercií, nebo ve zvláštních případech tercií durovou;
6. čistou kvintu.

V oblasti mixturové: durovou decimu, jakož i čistou duodecimu.

Kromě toho se mohou vyskytnout ještě další alikvotní tóny, například nona, undecima, tredecima, atd.

Přijatelné jsou **následující tolerance** (vyjádřené v šestnáctinách půltónu a vztažené k nárazovému tónu):

Prima:	+3
	-6
Spodní oktáva:	+3
	-10
Durová nebo mollová tercié:	+4
	-4*

*Tento odstavec měl být na návrh Poradního výboru pro německé zvony (Beratungsausschuss für das deutsche Glockenwesen) z roku 1966 rozšířen úměrně k pokroku v poznacích a dovednostech zvonářů následovně: "Interval prima - spodní oktáva nesmí být zúžen. Zvětšení je únosné do 8 šestnáctin půltónu, je-li prima nad nárazovým tónem, avšak jenom do 4 šestnáctin půltónu, leží-li pod nárazovým tónem." Svaz německých zvonářů (Verband deutscher Glockengiesser) souhlasil pouze s první větou tohoto doplnění.

Kvinta: snížené kvinty je možno tolerovat u mollových zvonů. Delší, zřetelný pokles však ovlivňuje rozvinutí zvuku a jeho charakter tak silně, že zvon musí být zamítnut. V každém případě je nutno usilovat o čistou kvintu. Malé sexty jsou přijatelné u mollových zvonů, velké u zvonů durových.

Mixturní oblast má obzvláštní význam pro charakteristiku rozvinutí zvuku a pro ozev zvonu. Je však třeba mít na zřeteli následující ožehavé body:

1. **Výrazné** alikvotní tóny od sebe nesmějí ležet blíže než v odstupě jednoho půltónu.
2. V místě, kde se principálová a mixturová oblast překrývá, mohou zaznívat pronikavé alikvotní tóny, které se při pomalém dozívání projevují jako pisklavé tóny, při rychlém dozívání jako vedlejší šum nebo dokonce, posunuto o oktávu dolů, přejímají charakter nárazového tónu ("ilegální" nárazové tóny).

Vysloveně disonantní pisklavé tóny mohou být důvodem k zamítnutí zvonu.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Vedlejší nárazové tóny ("ilegální" nárazové tóny) mohou být tolerovány jen tehdy, zůstanou-li víceméně nenápadné a nejsou-li v nesouladu s hlavním nárazovým tónem nebo s jinými nárazovými tóny ve zvonovém souboru.

B. Vyznívání

Dobrý zvon vyžaduje co nejdelší a správně proporcionální vyznívání hlavních tónů (tercie, primy a spodní oktávy). Při zvonění má nárazový tón ve spojení s primou bez zřetelného poklesu překlenout časový interval mezi dvěma údery. Hranici pro nejkratší trvání dozvuku hlavních tónů uvádějí následující tabulky (údaje v sekundách):

- a. zvony z cínového nebo křemíkového bronzu ve středním žeburu:**

		spodní oktáva	prima a tercie
u zvonů	do cis'	déle než 150 s	25 s
u zvonů od cis'	do e'	150-120 s	20 s
u zvonů od f'	do a'	110-85 s	17 s
u zvonů od ais'	do cis''	80-65 s	12 s
u zvonů od d''	do f''	60-50 s	10 s

- b. zvony ze slitin mědi-zinku-křemíku:

		spodní oktáva	prima a tercie
u zvonů	do h°	150 s	28 s
u zvonů od h°	do cis'	100 s	25 s
u zvonů od cis'	do e'	95-80 s	20 s
u zvonů od f'	do a'	75-60 s	17 s
u zvonů od ais'	do cis''	58-46 s	12 s
u zvonů od d''	do f''	45-35 s	10 s

- c. zvony z ocelolitiny a železné litiny:

		spodní oktáva	prima a tercie
u zvonů	do h°	60 s	22 s
u zvonů od h°	do cis'	50 s	18 s
u zvonů od d'	do fis'	40 s	14 s
u zvonů od g'	do h'	25 s	10 s
u zvonů od c''	výše	20 s	8 s

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Vyznívání (pokles amplitud alikvotních tónů) má probíhat pokud možno rovnoměrně. Chvění ve vyznívání jsou únosná pouze tehdy, nečiní-li zvuk zvonění neklidným nebo dokonce úplně trhavým.

****** Po provedených statistických zkoumáních na velkém počtu dobrých zvonů odpovídajících dnešnímu zvukovému ideálu budou připojeny souznačné údaje o tolerovaných hodnotách tlumení mixturových tónů.

C. Rozvinutí zvuku *******

******* Rozvinutí zvuku bylo dříve v terminologii znalců zvonů označováno jako rezonance; srov. Löbmannův výrok: "Zvon je tak dobrý, jak dobrá je jeho rezonance!"²

² Citován výrok Hugona Löbmann "Die Glocke ist musikalisch das wert, was ihre Resonanz wert ist," z jeho knihy *Das Glockenideal. Gedanken und Ratschläge*, Berlin 1928, s. 7; tento výrok se opakuje ještě na dalším místě knihy jako "Die Glocke ist das wert, was sie an resonanzreicher Klangfülle bietet." – tamtéž, s. 45.

Pro kvalitu zvonu není rozhodující jenom stavba zvuku a vyznívání spodní oktávy, nýbrž správné proporce v délce vyznívání a síla zvuku (amplituda) všech podstatných alikvotních tónů, což se dohromady označuje jako "rozvinutí zvuku".

Kvalita rozvinutí zvuku se dá prakticky poznat na:

- a. co nejdelším dozvuku primy, tercie a spodní oktávy. Zvuk zvonu, u nějž dlouho doznívá jen spodní oktáva, se přesto nemusí dostatečně rozvinout, ozývají-li se ostatní hlavní tóny nevýrazně a jen krátce;
- b. živé reakci alikvotních tónů na ladičku (= dobrá rezonance ve fyzikálním smyslu slova) a
- c. nepatrném rozptylu alikvotních tónů při jejich vyvolání.

Body *a*, *b* a *c* znamenají fyzikálně jedno a to samé, totiž co možná nejmenší tlumení.

Správné proporce ve smyslu rozvinutí zvuku je nutno získat i statistickým výzkumem dobrých zvonů podle dnešního zvukového ideálu.

Zásadní je též ozev zvonícího zvonu. Ozev je dobrý, je-li přechod alikvotních tónů mixturové oblasti do tónů oblasti principálové kontinuální a bez přerušování.

Zvony s nedostatečným rozvinutím zvuku je nutno zamítnout.

D. Vymezení označení žeber

Pro vymezení jednotlivých označení pro žebra zvonu *c'* z cínového bronzu platí následující minimální hmotnosti:

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

- těžké žebro: nejméně 2600 kg;
- středně těžké žebro: nejméně 2100 kg;
- lehké žebro: nejméně 1700 kg.

Oktávová hmotnost má činit přibližně osminásobek směrem dolů, popřípadě 1/8 nahoru.

Zvony, které nedosáhnou minimální hmotnosti lehkého žebra, se nesmějí nazývat jako "lehké žebro", nýbrž musejí nést označení odpovídající jejich ještě menší hmotnosti.

V zájmu srozumitelnosti a srovnatelnosti se pro zvonová žebra nemají používat vymyšlená pojmenování.

E. Tolerance slitiny

Zvony z cínového bronzu musejí být lity výhradně z pravé zvonoviny (78 % mědi a 22 % cínu), která nesmí obsahovat více než 2 % cizích příměsí, z toho maximálně 1 % olova. Minimální obsah čistého cínu musí činit 20 %.

V zájmu srozumitelnosti se pro slitiny nemají užívat libovolná pojmenování.

F. Srdce a zavěšení

Rozvinutí zvuku a zvukový účinek každého zvonu jsou ve velké míře závislé také na správném dimenzování srdce a na zavěšení zvonu. Proto se může konečná kolaudace uskutečnit až po zavěšení zvonu na věži.

Zavěšení na zalomené hlavě se přípouští jen ve zcela zvláštních, výjimečných případech, protože rozvinutí zvuku narušuje.

II. Soubor zvonů (zvonění)

Nejdůležitější zásada: rozhodující je v první řadě intervalový poměr nárazových tónů. Z toho je nutno vyvodit: jsou-li nepovedené nárazové tóny, je pokažen i celý soubor zvonů, i kdyby sestával z těch nejlepších zvonů. Zvony, jejichž nárazové tóny leží na heterogenní linii, je nutno bezpodmínečně zamítnout. To platí také pro průběh linie hlavních tónů. Nebezpečná oblast začíná u zvonového souboru menšího tónového rozsahu (až do sexty) u 3/16 půltónu. Na zvětšení intervalů je ucho méně citlivé než k zúžení. U oktávových rozpětí a většího tónového rozsahu má být respektována lehká změna (zvětšení od 2 do 4 šestnáctin půltónu), vyžadovaná sluchem. Jakmile uchu připadá tónová řada nečistá (odchyly od 4 do 6 šestnáctin půltónu), mohou být zvony odmítnuty v případě, že nemůže být provedeno odpovídající opravné doladění. Oprava je přípustná jen tehdy, neutrpí-li přitom újmu ani vnitřní harmonie, ani rozvinutí zvuku.

Zesílení disonantních prim prostřednictvím zesílených alikvotních tónů zvonů téhož souboru opravňují k zamítnutí rušivého zvonu.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Všechny zvony v jednom souboru musejí být v objemu svého zvuku dynamicky vyvážené a musejí se k sobě hodit barvou zvuku. Odlišuje-li se jeden zvon natolik, že ruší jednotu celku, nebo ho ostatní zvony zvukově potlačují a překrývají, může jej kolaudátor zamítnout, i kdyby byl použitelný samostatně.

Při doplňování historických zvonů je potřeba projevit obzvláštní pečlivost a ohled. Ve zvláštních případech, například při doplňování vzácných a osobitých starých zvonů, může být za určitých okolností znalcem smluvně vyžadována také stavba zvuku odchylovající se od dnešních norem.

Závěrečná poznámka

Pro posouzení výsledků zkoušky zvonů platí, že všechny faktory je nutné pečlivě zvážit i postavit proti sobě. Tak například může být popřípadě tolerována neurčitější stavba alikvotních tónů (vnitřní harmonie), je-li dobré rozvinutí zvuku zvonu a ozev zvonu; za určitých okolností však musí vést k zamítnutí zvonu, sejde-li se s širokým rozptylem a nedostatečnou reakcí alikvotních tónů (nedostatečné vyznívání). Ne zcela bezchybnou linii nárazových tónů je možné tolerovat jen tehdy, pokud je vyvážena dobrým rozvinutím zvuku nebo zvláštními kvalitami jednotlivých zvonů. Nakonec tedy vždy rozhoduje celkový umělecký dojem.

Poloha alikvotních tónů stejně jako nárazových tónů může být popřípadě ještě zlepšena dodatečným doladěním. Rozvinutí zvuku se naproti tomu podle našich dnešních poznatků dá po odlití podstatněji zlepšit zřídka; úpravou jednotlivých alikvotních tónů se nanejvýše podaří odstranit různá tření a bloky.

Úkolem kolaudátora není jen kritizovat, nýbrž také promyšleným využitím zkušeností a postřehů nějak pozitivně přispět k dalšímu rozvoji.

Ochrana starých zvonů a uměleckých památek

O aktivní zachování starých zvonů, které nejsou jen zvukovými, nýbrž také formálními uměleckými památkami, je nutno obzvláště dbát ve smyslu památkové péče. Památkově cenné zvony vyžadují při rozšiřování zvonového souboru zvýšenou pozornost. Obtížnost zahrnout takové zvony se svébytnou skladbou zvuku do nového souboru zvonů není sama o sobě důvodem dát tyto zvony k přelití.

Do kostelních staveb, které jsou památkově chráněny, se nemá zvonový soubor pořizovat nebo doplňovat bez účasti příslušného památkového úřadu.

Vysvětlení k limburským směrnicím³

³ Naposledy publikováno ve sborníku *Glocken in Geschichte und Gegenwart. Beiträge zur Glockenkunde* [1971–1985], ed. Kurt Kramer, Karlsruhe 1986, s. 268–270.

Směrnice pro posuzování zvuku nových zvonů, Limburské směrnice Poradního výboru pro německé zvony, se udržely v praxi 28 let od jejich zveřejnění. Jejich přísné požadavky a úsilí zvonářů měly za následek, že umění lití zvonů dosáhlo v Německu nejvyšší úrovně od středověku. Důsledkem, neodpovídajícím duchu směrnic, však bylo, že se pozornost věnovala téměř výlučně stavbě zvuku zvonů, zatímco mnohé důležité faktory, které mají pro soubor zvonů (zvonění) a jeho zvukový účinek stejně velký význam, byly brány jako podružné.

Poradní výbor pro německé zvony proto pokládá za důležité podat k Limburským směrnicím vysvětlení a zpřesnění, aby předešel příliš tolerantnímu, nebo mylnému výkladu. Věci, o nichž se zmiňuje už úvod a závěrečná poznámka Limburských směrnic, ale které často zůstávají bez povšimnutí, mají mít podle úmyslu autorů větší význam.

1. Plánování a posuzování souboru zvonů (zvonění) se nemá omezovat jen na zvony samé. V úvahu je třeba vzít i následující body:

- nové, změněné stavební technologie a nové stavební materiály;
- statické a dynamické otázky;
- konstrukce zvonové stolice;
- správná úprava okenic (žaluzií);
- shoda velikosti souboru zvonů (zvonění) s poměry ve věži;
- sladění souboru zvonů (zvonění) se sousedním souborem zvonů (zvoněním);
- tvar srdce a zavěšení srdce;
- elektrické zvonící zařízení;
- bezpečnost přístupu do zvonové komory;
- problémy týkající se životního prostředí, jako hlasitost zvonění v blízkém okolí;
- možnosti hnízdění pro vzácné druhy ptáků.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Všechny tyto aspekty musejí být při plánování zohledněny a navzájem uvedeny do účelného vztahu. O správném spolupůsobení těchto faktorů může informovat pouze zkouška provedená na věži, která je proto nezbytná.

2. I nadále má být podporována čistota zvuku ve smyslu Limburských směrnic. Zvukové a umělecké posouzení se však nemá opírat výlučně o hodnoty uvedené ve směrnících. Stejnou důležitost pro zvukový účinek zvonu má rozvinutí zvuku (srov. Limburské směrnice výše, poznámka pod čarou o Löbmannovu výroku).

Duchu Limburských směrnic a úmyslům jejich autorů odpovídá, že se nové zvony s těmito požadavky shodují v nekorigovaném stavu. Úpravy tónů, které zvanař považuje za nutné, je nutno předem dohodnout s příslušným znalcem (kampanologem).

Jsou-li v dosahu plánovaného nového souboru zvonů (zvonění) slyšet sousedící zvony, je nutno v souvislosti s nimi zohlednit nárazové tóny.

3. Zvony jsou kulturní památky jak hudební, tak také výtvarného umění. Charakter zvonů jako památek může spočívat ve stáří, kráse zvuku a tvaru, vzácnosti zvuku a tvaru, původu ze známé dílny, účinku v souboru. Takové vlastnosti určují hodnotu zvonů jako kulturních památek. Posouzení památkové hodnoty nesmí být ve sporném případě ponecháno jen na jednom odborníkovi. Je potřeba shody nejméně dvou znalců, z nichž jeden může příslušet k Poradnímu výboru pro německé zvony a druhým je zástupce státní památkové péče.

Obecně je nutno označit jako kulturní památky všechny zvony, které přežily nedobrovolnou probírku během dvou světových válek. Korekce jejich zvuku zbroušením, kvůli lepšímu zvukovému zapojení do souboru zvonů (zvonění), by znamenala zničení zvukového dokumentu a je nepřijatelná.

Při doplnění nových zvonů k historickým zvonům může být potřebné se ze zvukových důvodů od směrnic odchýlit. Tyto odchylky se musejí předem smluvně stanovit.

4. Osvědčilo se srdce elipsoidní (s pěstí tvaru elipsoidu), s jednoduchým koženým závěsem a neoddělitelnou pěstí. S tímto srdcem se dosáhlo dosud nejlepšího ozvu a rozvinutí zvuku zvonů. Stará, kovaná železná srdce, především v historických zvonech, by měla tam, kde je to technicky a zvukově oprávněno, zůstat zachována.

5. Dobře provedená dřevěná hlava má ze zvukových a estetických důvodů dostat přednost před hlavou ocelovou. U historických zvonů je nutno používat namísto dnes častých kulatých železných závěsů plochou ocel, ve zvláštních případech kované třmeny.

6. Ze zvukových a technických důvodů je nutno dát přednost dřevěné zvonové stolici před ocelovou.

7. Použije-li se progresse žeber,⁴ mohou být pořízeny soubory zvonů (zvonění) vyvážené v objemu a dynamice zvuku. Progrese žeber se osvědčila a doporučuje se.

⁴ V originále "Rippenprogression". Myšlenka, kterou prosazoval německý kampanolog, evangelický farář Theo Fehn (1910 až 1984). Progrese (zvětšení) hmotnosti, dosažená

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

úpravou tvaru žebra, způsobí, že při stejné výšce tónu má zvon větší a lepší objem zvuku (volumen). Menší zvony, s vyšším laděním, pak ve zvonovém souboru nezanikají. Tento postup se dodnes používá. Theo Fehn vymyslel a prosadil mimo jiné také použití srdce s elipsoidní pěstí.

8. Největší pozornost je třeba věnovat intonaci zvonu. Pro zvukový účín zvonu je rozhodující pečlivé seřízení zvonického stroje a nastavení nejvhodnějšího místa úderu srdce do zvonu. Pro zachování dobré intonace a pro bezpečnost provozu zvonů je nezbytné provádět pravidelnou údržbu. Údržbou by měl být zpravidla pověřen zvonář jako hlavní osoba odpovědná za celkový hudební dojem.

9. Zvonová komora musí být akusticky uzpůsobena tak, že hromadí a mísí zvuk zvonů, než vystoupí do volného prostoru. Přiměřeně uspořádaná zvuková okna a okenice (žaluzie) zkonstruované podle akustických principů podporují dobrý daleký účinek zvonového souboru, jakož i nevtíravý zvukový dojem v bližším okolí zvonice.

10. Historické dřevěné zvonové stolice, zvonová příslušenství a věžní hodiny by v zásadě neměly být odstraňovány. Je-li odstranění z technických důvodů nevyhnutelné, musejí být vhodným způsobem využity muzeálně jako kulturní památky, nebo smysluplně zachovány jiným způsobem.

Z němčiny přeložil Radek Lunga.

(Tento pracovní překlad byl pořízen ze sborníku příspěvků Glocken in Geschichte und Gegenwart. Beiträge zur Glockenkunde [1971-1985], ed. Kurt Kramer, Karlsruhe 1986, s. 263-268 a 268-270; pozn. RL)

Nové zvony a péče o staré zvonařské památky

Praxe pořizování nových souborů zvonů nebo doplňování historických zvonařských děl zvony novými je dnes různá. Odlišnosti najdeme mezi jednotlivými církvemi, v římskokatolické církvi pak mezi biskupstvími i farnostmi. Někdy se vše ponechá na zkušenostech dodávající zvonařské firmy, jindy se po celou dobu vzniku zvonu angažuje celá farní obec a na pořízení zvonů spolupracují další odborníci. Návrhy nových zvonů a jejich souborů, doporučení, kolaudační protokoly nebo posudky zpravidla vždy obsahují nějaké, ať už konkrétní, nebo velmi obecně formulované poukazy na texty normativní povahy - různé směrnice a nařízení. Ty se týkají nejen zvonů nově litych, ale i péče o zvony staré. Dostupnost těchto textů je velmi malá, a proto jsou zde některé zveřejněny. Všechny lze brát jako hodnotné východisko, pramen znalostí a srovnávací materiál.

V Čechách a na Moravě se tradičně užívají [Základní směrnice pro kolaudaci zvonu](#) z roku 1959. Východím textem pro ně byly německé směrnice pro posuzování nových zvonů, nazývané podle místa vzniku také [Limburské směrnice pro posuzování zvuku zvonů](#), z roku 1951. S vývojem nauky o zvonech v Německu byla česká kampanologie vždy spjata. Ve 20. a 30. letech 20. století tak byli v Čechách jako uznávané autority hojně citováni především Heinrich Otte, Peter Grüesbacher, Karl Walter a Hugo Löbmann. Opíral se o ně královéhradecký prelát Hugo Doskočil a také vyšehradský kanovník Václav Müller. Müllerově kampanologické práci poskytlo potřebnou počáteční oporu a důraz pelhřimovské "Chrámové družstvo pro Republiku československou", založené roku 1922, a v něm především pelhřimovský děkan František Bernard Vaněk. Kanovník Müller se velmi brzy stal mentorem tajemníků družstva Jana Sládka a Jaroslava Dobrodinského, z nichž druhý byl potom dlouhou dobu jediným kompetentním znalcem zvonů v republice, který dovedl objektivně posoudit jejich hudební kvalitu, ale uvědomit si také historickou cenu a památkovou hodnotu. Dobrodinský byl také spoluautorem zmíněné [české směrnice z roku 1959 \(podílel se na ní mj. také zvonař Rudolf Manoušek\)](#). Její závaznost je dnes jen fakultativní a mnohdy spíše záležitostí dohody. Nemohla už také dodatečně zohlednit německé "Vysvětlení k Limburským směrnicím", které mimo jiné zdůraznilo význam zachování historických a památkově cenných zvonů a správné péče o ně.

Změněná politická a společenská situace v Československu po roce 1989 konečně umožnila návrat zvonů do věží, poloprázdných od rekvizic druhé světové války, a také jejich svobodné užívání. To bylo jedním z důvodů vytvoření aktuální církevní normy upravující správnou údržbu, opravy a restaurování zvonů: [Interní normy České biskupské konference č. 10/1998 - Péče o zvony](#). Pro srovnání a další informace, například o svařování zvonů, můžeme využít německou směrnici [Restaurování zvonů](#), přijatou ekumenickým Poradním výborem pro německé zvony v roce 1990 (nelze ji však vcelku přebírat pro české poměry, protože obsahuje některé diskutabilní body).

Přestože jsou k dispozici tyto vyjmenované pomůcky, je na místě zdůraznit, že každý zvon je individualitou a podle toho je třeba k němu přistupovat a posuzovat jej v kontextu s jeho příslušenstvím (závěsem - hlavou, způsobem zavěšení, srdcem aj.), umístěním ve věži a vždy v souvislosti s místními podmínkami a popřípadě i s dalšími zvony v souboru.

Radek Lunga

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Péče o zvony (interní norma České biskupské konference)

Zvony jsou spjaty s životem Božího lidu, svolávají k bohoslužbách a vyzývají k modlitbě, ohlašují radostné i bolestné události. Patří k duchovnímu i kulturnímu dědictví národa a církve.

V péči o zvony se mají farníci (vždy s vědomím duchovního správce) zaměřit na tyto zásadní úkony:

- provedení úklidu ve zvonici;
- umístění vhodné sítě do oken věží proti ptákům;
- odstranění nečistoty ze zvonu;
- kontrola dotaženosti zvonu v závěsu;
- kontrola uvolněných šroubů závěsu;
- zpevnění uvolněné páky;
- kontrola stavu ložisek v závěsu a jejich přiměřené namazání;
- odstranění rozkvyvu zvonové stolice;
- kontrola, zda se srdce pohybuje v přímce nebo v elipse;
- kontrola stavu a pevnosti závěsného oka pro srdce.

Podrobnější pokyny k jednotlivým bodům:

- Úklid ve zvonici - je třeba upozornit na fyzickou náročnost této práce, nutnost opatrnosti tam, kde lze předpokládat zchátralost schodiště a podlah. Též je nutné hygienické zabezpečení celé akce (brigádníci přijdou do styku s exkrementy a rozkládajícími se mrtvolami ptáků).
- Pletivo je nutné umístit i do oken věží a přes žaluzie zevnitř. Je třeba dbát na důsledné uzavření okenice po zvonění i poklopu ve střeše z půdy.
- Zvony čistíme raději "na mokro", mírně vlažnou vodou, rýžovými kartáči (nikdy ocelovými!). Suché čištění je namáhavější a méně účinné. Při použití saponátu je nutno zvon nakonec celý opláchnout a osušit.
- Kontrolu dotažení závěsu a dotažení šroubů stahujících korunu zvonu provádíme tak, že zvon pevně uchopíme a zkusíme s ním otáčet. Cítíme-li vůli v pohybu, byť jen o několik milimetrů, je to varování. Šrouby stahující pásy koruny je třeba odrezit (petrolejem, brzdovou kapalinou nebo prostředkem Konkor) a poté matice klíčem dotáhnout. Bez tohoto opatření se bude vůle stále zvětšovat.
- Zpevnění uvolněné páky: pokud je páka původní (dřevěná), dotáhneme šroubky třmenu, v němž je páka uchycena. Pokud toto nepomůže, je možno dočasně páku zpevnit klínky z tvrdého dřeva. Zde jde pouze o provizorní opatření. Lépe je páku vyměnit,

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

optimální je zhotovit kopii z odpovídajícího dřeva. U ocelových pák dotáhnout šrouby a občas je zkontrolovat.

- Kontrola ložisek závěsu: zvon uchopíme a snažíme se jím "lomcovat" ze strany na stranu a sledujeme, zda osa závěsu popojíždí či nikoliv. Pokud ano, je nutná výměna ložisek, nebo (v případě kluzných ložisek) je třeba upravit vůli nastrčením podložek na čepy zvonové hlavy. Tento úkol je nutno svěřit zvonáři nebo zkušené firmě.
- Zvonová stolice nemá mít přímý styk se zdivem, aby se otřesy nepřenášely do zdiva. Pouhé zpevnění rozviklané zvonové stolice zvládne i dobrý řemeslník. Tam, kde jde o výměnu trámů, je třeba svěřit práci odborníkům.
- Kontrola závěsu (šarnýru) srdce. Srdce má opisovat přímou dráhu, nikoli eliptickou. Má tlouci do nejsilnější části věnce. Pokud tomu tak není, je třeba věc napravit. Šarnýr i závěs lze prodloužit nebo zkrátit (v řemenu bývají patřičné otvory). Je též třeba zkontrolovat, zda řemen není příliš zeslaben (prodřen). Řemeny bývají zajištěny ocelovým plechem, který v případě prasknutí řemenu zabrání vypadnutí srdce, pokud není plech prorezavělý. I zde je v případě pochybností lépe svěřit práci odborníkovi. U nových srdcí zavěšených na pevné nízké ose s protizávažím tato starost odpadá. Je však třeba důrazně varovat před instalací těchto nových konstrukcí do starých zvonů.

Základní normy pro restaurátorské zásahy v péči o zvony:

1. Při potřebném restaurování zvonu je třeba spolupracovat s diecézním kampanologem, v případě památkově chráněných zvonů též se znalci státní památkové péče (podle zákona č. 20/1987 Sb.). Závazné stanovisko vydává okresní úřad na základě odborného vyjádření památkového ústavu nebo znalce.
2. Vytlučení úderového kruhu (věnce) v místě úderu srdce nemá přesáhnout 10% (v případě ručního zvonění 12 až 15%). Nad tuto normu je již třeba vyvaření vytlučených míst.
3. Při zjištění patrné trhliny a výrazné změny zvuku zvonu je třeba ihned přestat se zvoněním.
4. Provedený svar musí být kvalitní, bez pórů, homogenně spojen s tělesem zvonu. Povrch svaru kolem trhliny ať je omezen na minimum. Původní základní charakter zvuku a tón nesmí být změněn. Je třeba počítat s nevyhnutelnou změnou zabarvení v důsledku svaru. Při svařování zvonu jde o vysoce náročnou práci, kterou lze svěřit pouze zkušenému zvonáři. Jakékoli amatérské svařování autogenem či jinými prostředky je nepřípustné.
5. Reliéfy, ozdoby a nápisy ať jsou předem sejmuty do forem odbornou metodou s ohledem na význam kulturní památky. Před opravou je třeba zvon dokumentovat, zejména fotograficky, a to včetně příslušenství.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

6. Chybějící díly koruny se mají dodatečně vytvarovat a navařit jako jednotlivé třmeny koruny, jako díly koruny nebo celá koruna. Zásah má být omezen na nutnou míru danou technikou svařování.
7. Není přípustné provrtání hlavy (hřídele) zvonu ani "čepce" (horní části korpusu zvonu) pro narušení hmoty zvonu, zvuku a uměleckého charakteru zvonu.
8. Je třeba varovat před tzv. přelitím zvonu, které ruší historickou i kulturní identitu původního zvonu. V dnešní době, kdy je známa technika svařování, je tato praxe všeobecně odmítána. U historických zvonů je přelití, třeba i puklého zvonu, nutno rozhodně odmítnout.
9. Každý záměr elektrifikace zvonu zásadně konzultovat s diecézním kampanologem. Trvat na smluvním zajištění servisní péče o vyzváněč. Při elektrifikaci památkově chráněných zvonů je nutno vyžádat stanovisko památkové péče. Převzetí práce zajistit takovým způsobem, aby zjevné zásady byly zjištěny před zaplacením faktury, a požadovat jejich odstranění.
10. Původní dřevěné závěsy zvonu nenahrazovat ocelovými nosníky (traverzami). Nezavěšovat památné zvony na zalomené osy a neinstalovat do nich tzv. padající srdce nebo srdce s protizávažím. Srdce pro historické zvony, stejně tak jako i pro nové zvony, musí mít odpovídající tvar a velikost.

(Zpracoval Petr Vácha. Publikováno jako součást svazku Interní normy č. 10/1998. Péče o zvony, varhany, movité památky, archiválie a farní kroniky. Vydal sekretariát České biskupské konference, Praha 1999, s. 4-8. Normy byly zpracovány z podnětu komise pro kulturu při České biskupské konferenci a schváleny na plenárním zasedání ČBK 4. července 1998 na Velehradě.)

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Restaurování zvonů (německá směrnice)

Všeobecná část

1. Při restaurování zvonů - stejně jako při jejich sváření - je potřebná spolupráce zadavatele zakázky, dohlížejších úřadů, odborných poradců a provádějících firem.
2. K plánování restaurátorských prací na zvonu, který je nějak poškozen, je nutné kromě dohlížejšího úřadu přizvat příslušného diecézního kampanologa.
3. Prováděním restaurátorských prací na zvonech smí být pověřena pouze zkušená zvonařská firma a zkušený svářeč zvonů.
4. Aby se zabránilo škodám, zejména na památkově cenných zvonech zasluhujících ochranu, je žádoucí, aby odborně způsobilá firma - nejlépe zvonařská - prováděla jejich pečlivou údržbu.

Preventivní opatření k zachování zvonů

1. Každý zvon podléhá opotřebení působením úderů srdce do oblasti úhozového okruhu (věnce). Obzvláštní nebezpečí pro zvony vzniká při nedostatečné údržbě, špatných technických parametrech, mj. kvůli špatně dimenzovanému srdci nebo příliš vysokému či příliš nízkému úderu srdce. Poškození na nejsilnějším místě zvonu, úderovém okruhu (věnci), nesmí v žádném případě činit více než 10% jeho tloušťky. Při poškození v takové míře je velmi žádoucí vyvaření porušených míst, a to i v případě, že se to ještě neprojevuje na kvalitě zvuku.
2. Zvony, které bijí ještě v první úderové poloze, by za jistých okolností mohly být otáčením ohroženy.
3. Aby bylo možno zvonit šetrně, jakož i pro dobrou intonaci a k minimalizaci rizika prasknutí zvonu, může být nutné osazení nového srdce, které je přiměřené danému stavu zvonu.

Restaurování prasklého zvonu

1. Utrpí-li zvon nějakou škodu, je-li slyšet zřetelná negativní změna zvuku nebo objeví-li se viditelná trhлина, musí se zvon okamžitě odstavit z provozu.
2. Při restaurování zvonů sváření se pro jejich uměleckohistorický význam musí opracování místa praskliny omezit na nutné minimum. Důraz je nutno položit zvláště na sváření bez pórů.
3. Nevyhnutelné zbarvení povrchu zvonu vzniklé nahřátím celého zvonu je třeba tolerovat.
4. Technologický postup sváření musí zaručit homogenní spojení švu (svaru) s hmotou zvonu. Původní charakter zvuku a tón zvonu nesmějí být sváření nijak změněny.

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

5. Záruční lhůta na svaření zvonu je deset let.
6. Výzdobu, ornamenty a nápisy, které by plánované svaření mohlo poškodit, je nutno před svařením uchovat pomocí otisků do silikonu nebo jiným, stejně vhodným způsobem. Jejich dodatečné napodobeniny je u svařovaných zvonů možné vytvářet jen s vědomím odpovědnosti umělecké i odpovědnosti k památkové péči.

Ucha koruny a čepec zvonu

1. Koruna je součástí zvonu a stylovým prvkem své doby. Každé restaurování musí na tuto skutečnost brát ohled.
2. Chybějící části koruny je nutno vytvořit podle předlohy a musejí být přivařeny jako jednotlivá ucha koruny, jako část koruny nebo jako celá koruna. Přitom se smí do zvonu zasáhnout pouze v takovém rozsahu, který je nutný z hlediska svářecí technologie.
3. Každé provrtání čepece citelně změní zvon v podstatě jeho umělecké a zvukové jednoty. Jakékoli provrtání čepece zvonu je proto nepřípustné.

Oko k zavěšení srdce zalité do čepece

Vsazené oko je neoddělitelnou součástí zvonu a slouží k zavěšení srdce. Je-li zvon poškozen natolik, že se musí svařit, a zjistí-li se současně poškození oka, je při svařování nutno zasadit nové, kované oko.

Z němčiny přeložil Radek Lunga.

(Tyto směrnice byly ekumenickým Poradním výborem pro německé zvony schváleny 7. května 1990 v Goslaru. Vytvořil je pracovní výbor ve složení Tilmann Breuer, Gerhard Eiselen, Kurt Kramer, Heinrich Krempel, Hans Lachenmeyer a Hans Gerd Rincker. Publikovány byly ve sborníku Jahrbuch für Glockenkunde, 1991-1992, roč. 3-4, s. 151-152, a s drobnými odchylkami ve sborníku Beiträge zur Glockenkunde. 1986 bis 1992 (ed. Beratungsausschuss für das Deutsche Glockenwesen). Karlsruhe: Badenia Verlag und Druckerei GmbH, 1993, s. 24-25; odtud byl pořízen tento pracovní překlad, pozn. RL.)

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Základní směrnice pro kolaudaci zvonu

A. Zvuk zvonu

Základem budiž $a_1 = 435$ Hz, odchylky v osminách půltónu (1/16 tónu).

V oblasti principálové řady alikvotních tónů se vyžaduje:

1. Zřetelný a jednoznačný nárazový tón (dále NT), který je tónem hlavním a základním, k němuž jedině mají všechny ostatní zvukové prvky svůj vztah.
2. Alikvotní prima musí souhlasit s NT.
3. Čistá spodní oktáva, vrchní kvinta a oktáva.
4. Jasně vybarvená tercie mollová či durová.

Z mixturních alikvotních tónů se požaduje podle velikosti zvonu durová decima, čistá duodecima a superoktáva. Vyskytnou-li se i jiné hlasy, jako IX, XI, XIII, nesmí rušivě vystupovat a nemohou tvořit menší interval než půltón.

Rušivé prvky, objevující se někdy na přechodu z principálových do mixturových hlasů, mohou být důvodem k neschválení zvonu. Poněvadž mixtury mají velký význam pro lehký ozev, a tudíž pro vlastní rozvinutí a uplatnění zvuku, je třeba jim věnovat zvláštní pozornost.

Přípustné výškové tolerance u alikvotních tónů:

I	+2	-3
VIII	+4	-3
III	+2	-2
V	+6	-4

B. Rezonance - vyznívání zvonu

Na přiměřeně dlouhém, vyrovnaném a klidném doznívání zvuku zvonů po nárazu srdce je nutné trvat v rozpětí této zásadní stupnice:

	VIII	I-III
c1	120 s	30 s
f1	95 s	25 s
a1	80 s	22 s
cis2	60 s	17 s
f2	55 s	12 s
a2	40 s	10 s

Středoškolská odborná činnost 2005/2006

Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

Při zvučnosti zvonu se posuzuje:

- a. Úměrně dlouhé a silné vyznívání po úderu. Nestačí tedy jen doznívání spodní oktávy.
- b. Dobrý ozev všech alikvotních tónů na ladičku.
- c. Lehký ozev zvonu a přechod z principálů do mixtur bez zlomu. Zvony nedostatečně zvučné s event. zdvojenými alikvotními tóny nutno zamítnout.

C. Technické náležitosti zvonu

Označení zvonových žeber při váze pro zvon a1:

těžké	1150 kg	Ptáčkovo
střední	450 kg	Manouškovo
lehké	340 kg	Colbachiniho

Oktávová váha se pohybuje cca 8,5-krát směrem nahoru i dolů. V případě spojení nových zvonů se zvonem starým je třeba volit žebro podle zachovaného zvonu starého.

Materiál zvonu

Zvonovina vyžaduje 78 % mědi a 22 % cínu. Přípustná tolerance je a 1 %. Cín však nikdy nesmí klesnout pod 20 %. Odlití zvonu musí být čisté, bez bublin a pórovitých kazů. Povrch zvonu nesmí být broušen nebo pilován, nýbrž jen očištěn pískem a vodou. Je přípustná povrchová konzervace vosky.

Příslušenství zvonu

Rytmus a dynamika zvonu, jakož i zvukové uplatnění je závislé na příslušenství zvonu a způsobu jeho zavěšení. Definitivní schválení zvonu může být proto provedeno až na věži. Použití hluboko položených (zalomených) os je přípustné pouze spolu s odpovídajícím zavěšením srdce.

U starých zvonů se požadují jen dubové závěsné hlavice. Z důvodů fyzikálně-akustických se doporučují užívat i u nových zvonů.

Srdce

Obuškovité srdce má mít průměr hrušky 4/3 síly nárazového věnce, váhu 2,5% - 4% váhy zvonu. Výpustka srdce má mít délku rovnající se síle nárazového věnce.

Pro posouzení rytmu zvonů slouží tato tabulka počtu úderů v minutě:

Zvon o váze

váha	úderů/min
------	-----------

Středoškolská odborná činnost 2005/2006
Obor 09 – strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

2000 kg	45
1500 kg	49
1000 kg	52
500 kg	56
300 kg	58
150 kg	61
100 kg	64

D. Soubor zvonů

Hlavním hlediskem hodnocení souboru zvonů je intervalový poměr NT. Zvony, které nárazovými tóny vybočují ze žádoucí dispozice, je třeba zamítnout. Tolerance u zvonů disponovaných v rozsahu sexty je $3/8$ půltónu s přihlédnutím ke skutečnosti, že na zvětšení intervalu je lidské ucho méně citlivé než na zúžení. U větších rozsahů (nad oktávu) je žádoucí malá gradace (zvětšení intervalů až o $2/8$ půltónu). Nejasné intervaly mezi jednotlivými zvony nebo vystupující disonantní alikvotní tóny jsou důvodem k neschválení rušivě znějících zvonů. Jestliže je zvuk některého zvonu souboru příliš výrazný, nebo naopak zaniká, musí být vada odstraněna vhodným technickým vybavením. Kdyby se tyto úpravy nesetkaly s uspokojivým výsledkem, je nutno takový zvon zamítnout.

Případná změna ladění v dispozici melodickou je možná, nedoporučuje se však obrátit k dispozici harmonické.

E. Závěr

Při konečném hodnocení je třeba posoudit všechny vlastnosti zvonu. Menší nedostatky u alikvotních tónů mohou být vyváženy mimořádně dobrým ozevem a zvučností zvonu. Také u souborů je možno shovívavě posuzovat (s výjimkou zvonové hry) přesnost melodie NT, jsou-li zvony jinak vyhovující.

Staré historicky cenné zvony vyžadují zvláštní péči. Je-li ku starému zvonu pořizován zvon nový, je možné požadovat u nového zvonu speciální přizpůsobení alikvotních tónů a originální žebro. Obtížnost zapojení starých zvonů mezi zvony nové nemůže být nikdy důvodem k přelití starých zvonů.

Před renovací puklých zvonů a jinými opravami starých, historicky cenných zvonů nebo při doplňování souborů takových zvonů novými díly je třeba vyžádat si před započítáním prací pokyny kampanologa - soudního znalce (viz výnos Ministerstva kultury č. 52994/1955).

Při stanovení těchto směrnic bylo přihlédnuto k usnesení německých kampanologů a zvonářů na Deutscher Glockentag Limburg 6.-9. června 1951 a potvrzených na sjezdu kampanologů a zvonářů v Norimberku 5.-8. června 1956.

V Praze, dne 18. září 1959

(Vydal Státní ústav památkové péče a ochrany přírody v Praze jako směrnici č. 4491/1959)