

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra technologických zařízení staveb**



**Diplomová práce**

**Posouzení použitelnosti CAD programů**

**Bc. Tomáš Malý**

**© 2021 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Malý

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Posouzení použitelnosti CAD programů

Název anglicky

Assessment of usability of CAD programs

---

### Cíle práce

Diplomová práce je tematicky zaměřena na posouzení použitelnosti a výkonnosti různých typů CAD programů. Hlavním cílem je stanovení typových úloh, jejich realizace ve všech zvolených editorech a zhodnocení vhodnosti použití jednotlivých CAD programů pro konkrétní úlohy se speciálním zaměřením na ergonomii ovládání a přenositelnost programových výstupů. Dílčím cílem pak bude zhodnocení ekonomické výhodnosti používání jednotlivých editorů pro akademickou sféru.

### Metodika

Metodika řešení diplomové práce je založena na studiu zdrojů, analýze odborných informačních zdrojů a vyvození závěrů z praktického vyhodnocení testovacích úloh.

**Doporučený rozsah práce**

50 stran, včetně příloh

**Klíčová slova**

CAD, software, porovnání, použitelnost, ergonomie

---

**Doporučené zdroje informací**

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor: tvorba digitálních prototypů. 3., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2012. Učebnice (Computer Press). ISBN 978-80-251-3728-4.

RUSIŇÁK, Miroslav a Jaroslav KLETEČKA. Solid Edge – verze 18: učebnice. Praha: M. Rusiňák, c2006. UGS velocity series. ISBN 80-239-7142-5.

WYSACK, Roy L. a Jaroslav KLETEČKA. Designing parts with SolidWorks: tvorba digitálních prototypů. San Diego: CAD/CAM Publishing, 1997. Učebnice (Computer Press). ISBN 09-348-6922-7.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/2021 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Michal Hruška, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 02. 2021

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Posouzení použitelnosti CAD programů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne .....

---

**Bc. Tomáš Malý**

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalu Hruškovi, Ph.D. za pomoc při vedení diplomové práce. Děkuji také Ing. Martinu Fůsovi z fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT, za spolupráci a odborné podklady, které byli využity při tvorbě diplomové práce.

# Posouzení použitelnosti CAD programů

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá tématem posouzení použitelnosti CAD programů. Pro porovnání byli zvoleny programy AutoCAD, SolidWorks a SpaceClaim. Na program SpaceClaim navazují i další programy s podporou FEM analýzy, která se v práci také objevuje. Konkrétně se jedná o Workbench a Mechanical. Teoretická část diplomové práce představuje komplexní souhrn informací o funkci jednotlivých programů, včetně historie technologie CAD a s ní spjatými nástroji. Rovněž se v teoretické části rozebírá teorie oftalmologie, jelikož praktická část je zaměřena na tvorbu příkladů z tohoto oboru. V praktické části diplomové práce se na zvolených příkladech vyhodnocuje vhodnost použití CAD programů. Zohledněna je i ekonomická výhodnost použití. Hlavní poznatky z porovnání jsou shrnuty v závěru diplomové práce, kde je i výsledné vyhodnocení.

**Klíčová slova:** CAD, FEM, modelování, použitelnost, oftalmologie

# Assessment of usability of CAD programs

## Abstract

This diploma thesis deals with the topic of assessment of usability of CAD programs. For the comparison, programs AutoCAD, SolidWorks and SpaceClaim have been chosen. The SpaceClaim program is connected to other programs with support for FEM analysis, which are also a part in the work. Specifically, these programs are Workbench and Mechanical. The theoretical part of the diploma thesis presents comprehensive summary of information about the function of the individual programs, including the history of CAD technology and its related tools. The theoretical part also discusses the theory of ophthalmology, because the practical part of the thesis is focused on creating examples from this field. In the practical part of the diploma thesis, the suitability of using CAD programs is evaluated on selected examples. The financial aspect is also taken in account. The main differences from the comparison are summarized in the conclusion of the diploma thesis, as well as the final evaluation.

**Keywords:** CAD, FEM, modeling, usability, ophthalmology

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Cíl práce a metodika .....</b>	<b>12</b>
2.1 Cíl práce .....	12
2.2 Metodika .....	12
<b>3 Teoretická část.....</b>	<b>13</b>
3.1 Úvod do technologie CAD.....	13
3.2 Historie CAD .....	14
3.2.1 Počátky.....	15
3.2.2 Současnost .....	18
3.3 PDM .....	20
3.4 PLM.....	21
3.5 Porovnání 2D a 3D CAD .....	23
3.6 2D CAD Software .....	24
3.6.1 AutoCAD .....	25
3.7 3D CAD Software .....	26
3.7.1 SolidWorks .....	27
3.7.2 SpaceClaim .....	29
3.8 FEM.....	31
3.8.1 Workbench & Mechanical .....	32
3.9 Oftalmologie .....	34
3.9.1 Lidské oko.....	35
3.9.2 Nitrooční čočka.....	38
<b>4 Praktická část .....</b>	<b>41</b>
4.1 Tvorba modelu oka .....	41
4.1.1 AutoCAD .....	41
4.1.2 SolidWorks .....	43
4.2 Model torické nitrooční čočky .....	50
4.3 Testování FEM.....	54
4.4 Zhodnocení a kalkulace.....	58
4.4.1 Využití v akademické sféře.....	59
<b>5 Závěr.....</b>	<b>61</b>
<b>6 Reference.....</b>	<b>62</b>



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka práce se světelným perem [6] .....	15
Obrázek 2: Výřez letadla Boeing 777 [9] .....	17
Obrázek 3: Vývoj CAD-PDM-PLM [12] .....	20
Obrázek 4: Cyklus PLM [14].....	22
Obrázek 5: Strukturní analýza odpružení, kritérium napětí von-Mises [40] .....	32
Obrázek 6: Anatomie oka .....	35
Obrázek 7: Ukázka torické nitrooční čočky [57].....	39
Obrázek 8: Zarovnání centračních bodů během operace [61] .....	40
Obrázek 9: AutoCAD, Návrh 1 .....	41
Obrázek 10: AutoCAD, Návrh 2 .....	42
Obrázek 11: AutoCAD, Návrh 3 .....	43
Obrázek 12: SolidWorks, Základ tělesa .....	44
Obrázek 13: SolidWorks, Detail oddělení rohovky .....	44
Obrázek 14: SolidWorks, Řasnaté tělísko .....	45
Obrázek 15: SolidWorks, Tvorba čočky.....	45
Obrázek 16: SolidWorks, Cévnatka.....	46
Obrázek 17: SolidWorks, Sítnice.....	46
Obrázek 18: SolidWorks, Zrakový nerv .....	47
Obrázek 19: SolidWorks, Zonula .....	47
Obrázek 20: SolidWorks, Zonula – detail .....	48
Obrázek 21: Textura sítnice .....	48
Obrázek 22: Textura zonuly .....	48
Obrázek 23: Textura duhovky .....	48
Obrázek 24: SolidWorks, Žlutá skvrna.....	48
Obrázek 25: SolidWorks, Řez oka 1/2.....	49
Obrázek 26: SolidWorks, Řez oka 2/2.....	49
Obrázek 27: SolidWorks, Finální model oka.....	50
Obrázek 28: AcrySof MN60AC [62].....	50
Obrázek 29: Rozpětí haptiky vůči centračním bodům.....	51
Obrázek 30: SpaceClaim, První kroky .....	51
Obrázek 31: SpaceClaim, Tvorba haptiky .....	52

Obrázek 32: SpaceClaim, Kruhové pole.....	52
Obrázek 33: SpaceClaim, Tvorba čočky .....	53
Obrázek 34: SpaceClaim, Finální model .....	53
Obrázek 35: Workbench, Základní struktura.....	54
Obrázek 36: Mechanical, Označení materiálu pro model TIOL .....	54
Obrázek 37: Mechanical, Nastavení sítě.....	55
Obrázek 38: Mechanical, Meshed model .....	55
Obrázek 39: Mechanical, Strukturní analýza.....	55
Obrázek 40: Mechanical, Napětí von-Mises.....	56
Obrázek 41: Mechanical, Celková deformace .....	56
Obrázek 42: Workbench, Tabulka hodnot.....	57
Obrázek 43: Workbench, Vytvořený graf.....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1: AutoCAD, Porovnání ceny .....	26
Tabulka 2: SolidWorks, Porovnání ceny .....	29
Tabulka 3: SpaceClaim, Porovnání ceny .....	31
Tabulka 4: Ansys Mechanical Enterprise, Porovnání ceny .....	34

## Seznam použitých zkratk

CAD	Computed Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
AR	Artificial Reality
VR	Virtual Reality
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
FEM	Finite Element Method
FEA	Finite Element Analysis
CFD	Computational Fluid Dynamics
IOL	Intraocular lens
TIOL	Toric Intraocular lens
EDoF	Extended Depth of Focus
LASIK	Laser-Assisted in Situ Keratomileusis

# 1 Úvod

Computer Aided Design, zkráceně jen CAD, je pojem, který zahrnuje použití počítačů při vytváření, úpravách, analýze nebo optimalizaci návrhů. Použití CAD programů je v současné době běžným trendem v odvětvích jako strojírenství, stavebnictví, elektrotechnika, ale do určité míry i medicína, kde si svoji pozici stále buduje. Oblast analýzy a simulací, které jsou na CAD technologii přímo závislé, umožňuje například testovat fyzické vlastnosti dílů před jejich uvedením do výroby.

Stejným způsobem se nyní postupně ustupuje od fyzických prototypů například ve strojírenství, jelikož důležité hodnoty zahrnující strukturní analýzy lze získat z velmi přesných simulací. Obdobným způsobem se vyvíjí i obory v medicíně. Před plánovanou operací se celý proces nasimuluje a lékaři tak získají důležité informace, které posléze využijí při samotné operaci, do celého procesu lze zakombinovat i 3D sken, díky kterému se může automaticky tvořit 3D model pro další zkoumání v CAD programech, nebo rovnou 3D tisk pro tvorbu implantátů na míru.

Cílem práce je vytvořit hodnotný přehled teorie o technologii CAD, včetně historie této technologie, bližšího seznámení s použitými procesy a programy, které jsou využity v praktické části diplomové práce. Konkrétně se jedná o CAD programy AutoCAD, SolidWorks a SpaceClaim. Na poslední zmiňovaný navazují programy Workbench a Mechanical pro FEM analýzu, která je obdobně jako technologie CAD popisována i v teoretické části. Rovněž je zmiňován i obor medicíny oftalmologie, kvůli zaměření vypracovávaných příkladů. Hlavním cílem práce je vyhodnocení výsledků práce, popisující vhodnost použití zvolených programů v akademické i firemní sféře, na kterou navazuje i zhodnocení finanční stránky.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem této diplomové práce je posouzení použitelnosti vybraných CAD programů na rámcových příkladech z oboru oftalmologie. Teoretická část bude obsahovat stručnou historii problematiky CAD, vysvětlení základních pojmů a navazujících technologií, popis zvolených programů a obecné informace z oblasti oftalmologie. Praktická část bude zaměřena na realizaci příkladů z oboru oftalmologie ve zvolených CAD programech. Dílčím cílem je zhodnocení ekonomické vhodnosti vybraných CAD programů a určení jejich oblasti využití, včetně zhodnocení jejich možností využití v akademické sféře.

### **2.2 Metodika**

Pro realizaci teoretické části diplomové práce bude využito studia a analýzy odborných zdrojů, které mají čtenáři předat obecný přehled o problematice CAD modelování a základní informace z oboru oftalmologie. Praktická část bude popisovat práci na úlohách v jednotlivých CAD programech a následně bude obsahovat vyhodnocení zjištěných poznatků. V závěru diplomové práce bude zhodnoceno porovnání analyzovaných CAD programů s využitím znalostí získaných při tvorbě praktické i teoretické části diplomové práce.

## 3 Teoretická část

### 3.1 Úvod do technologie CAD

Současná podoba CAD programů představuje mnohem víc než jen kreslení čar za pomoci elektronických prostředků. Vývoj v odvětví počítačového navrhování přispěl k vytvoření zdravé konkurence v oblasti CAD, která pro zákazníky znamená přístup k rychlejší a levnější výrobě lepších návrhů. Produktivita CAD programů je vylepšena možnostmi programu, které při náčrtu umožňují snadné kreslení polygonů, elips, více paralelních čar a křivek. Rychlost návrhu se může zvyšovat i například použitím možností pro automatické zaoblení a zkosení. Funkce kopírování, otáčení a zrcadlení jsou také velmi užitečné, především při kreslení symetrických částí. Stejně tak možnosti přiblížení a oddálení mohou být výhodou při kreslení v měřítku. Veškeré informace o CAD návrhu jsou uloženy v digitální podobě, proto je možné, bez ohledu na případnou velikost tištěných výkresů, komponenty přesně dimenzovat. Výkresovou dokumentaci lze jednoduše upravovat umístěním návrhu, či modelu a zvolením vhodné orientace, aby výkres splňoval všechny normy a požadavky zadavatele. Systémy CAD mají dále schopnost uložení součástí, které uživatelé často používají, do vlastních knihoven. Knihovny mohou obsahovat i řadu normovaných dílů, které jsou buď přímo dostupné, nebo je třeba je zakoupit samostatně od výrobce. Software CAD je velmi vhodný pro opakovanou a rychlou dokumentaci, kde je produkt v různých velikostech. [1]

Úpravy výkresů za účelem provádění revizí a vytváření aktualizovaných seznamů dílů jsou pomocí současných CAD systémů rychlé a snadné, většina produktů rovněž umožňuje zákazníkům využít své cloudové servery pro uložení svých prací nebo rovnou ke spolupráci v rámci týmů návrhářů. Změny a úpravy na ručně kreslených výkresech často vyžadují nakreslení zcela nového výkresu, což bývá časově velmi náročné. V CAD programech lze provést změnu okamžitě a nový výkres tak může být hotový během několika minut, kromě fyzické podoby má uživatel zároveň možnost výkres okamžitě přenést prostřednictvím internetu do celého světa. Vytváření složité geometrie na papíře často zahrnuje spoustu měření a nutnost umístění referenčních bodů. Pro CAD program je to mnohem jednodušší a případné revize tak již nejsou problém. Mnoho programů CAD také obsahuje aplikační rozhraní, které umožňuje uživatelům vlastní přizpůsobení CAD

programu jejich konkrétním potřebám, využití tak nachází u různých plug-in aplikací, které lze s CAD programem propojit a poskytnout tak uživateli další funkce. [1]

Ve stále větší míře se CAD systémy využívají ke tvorbě virtuálních prototypů, které jsou naopak od prototypů fyzických mnohem méně nákladné a jejich tvorba rovněž zabere méně času, to však nijak neubírá na jejich vypovídající hodnotě. Mnoho systémů CAD také umožňuje automatizované generování modelů, ke kterému stačí znát jen několik nosných bodů, které jsou pro výsledný model klíčové. Program dále z rozměrů součástí jednoduše vypočítá například povrchové plochy, objemy, těžiště, momenty setrvačnosti, poloměry otáčení a v závislosti na zvoleném materiálu i celkovou hmotnost. Vytvořené modely je posléze možné podrobit analýze konečných prvků (FEA), která pak ověří, zda návrh bude schopen odolat očekávaným zatížením. [2]

Možnosti propojení CAD a CAM systémů přinášejí značné zvýšení výkonnosti celého procesu tvorby součástí. Systémy CAD/CAM mohou vytvářet pokyny pro řídicí jednotky například pro soustruhy, frézky, razníky, obráběcí centra, svařovací zařízení nebo celé automatizované sestavy. Typický návrh zahrnuje tvorbu modelu v programu CAD až po dokončení návrhu a vytvoření vrstev geometrie požadovaných pro software pro zpracování CAM. Model vytvořený v programu CAD je přeložen do příslušného formátu, například DXF nebo IGES, ten je následně načten do programu CAM, který se poté použije k vytvoření drah nástroje, které tento popis sledují. Tuto dráhu lze v případě potřeby upravit a zkombinovat s dalšími soubory dráhy nástroje. Tato kombinace pak tvoří kompletní program pro obráběcí stroj k výrobě součástí. [3]

## **3.2 Historie CAD**

Technologie CAD se může jevit jako jedna z relativně nedávných inovací, historie této technologie se však datuje již více než 60 let. Úplně první základy pro technologii CAD však položil již okolo roku 300 př.n.l. Eukleidés z Alexandrie ve sbírce Eukleidovy Základy. Autor nemohl nikdy předvídat, jak bude vypadat dnešní CAD software, jeho dílo ovšem vysvětlilo mnoho postulátů a definic, které jsou základem eukleidovské geometrie, na které jsou dnešní systémy CAD postaveny. Technologie CAD má za sebou dlouhou a bohatou historii, která sahá několik desetiletí dozadu. Význam technologie CAD nelze podceňovat, především co se týče jejího rozvoje do budoucnosti. [4]

### 3.2.1 Počátky

Počátky historie technologie CAD sahají do roku 1957, tehdy vytvořil Patrick Hanratty první systém číslicového řízení, stanovil tak základy pro vývoj CAD programů, jak je známe v současnosti. Přesnost, univerzálnost a možnosti úprav návrhů CAD přispěli k revoluci v oblasti inženýrství, architektury a výroby. [5]

Patrick Hanratty vyvinul PRONTO (Program for Numerical Tooling Operations), který byl použit jako první programovací jazyk pro CNC, v roce 1957. Odhaduje se, že zhruba 70 % všech dnes dostupných 3D CAD systémů může vystopovat své kořeny zpět až k Hanrattého původnímu kódu. Po zavedení v roce 1957 však trvalo ještě desítky let, než se rozšířily relativně malé a cenově dostupné počítače. Tužka a papír tak zůstávali hlavním způsobem, jakým návrháři vytvářeli své výkresy po dobu bezmála dalších třiceti let. Byly však již položeny základy pro budoucnost, ve které CAD software bude základním nástrojem pro téměř každé výrobní odvětví. [5]

Nedlouho po vzniku jazyku PRONTO vyvinul Ivan Sutherland v roce 1963 program Sketchpad jako součást své práce na Massachusettském technologickém institutu. Uživatelé mohli s programem interagovat prostřednictvím obrazovky a světelného pera, díky kterému mohli kreslit čáry, nastavovat parametry nebo různá omezení. Program byl podle dnešních standardů celkem primitivní, ale ve své době byl považován za velmi složitý a pokročilý. I přes fakt, že software Sketchpad nebyl nikdy komerčně dostupný, naznačil ale cestu vývoje pro pozdější CAD software. [5]



Obrázek 1: Ukázka práce se světelným perem [6]

Jednou z nejprominentnějších událostí ve vývoji CAD bylo založení společnosti Manufacturing and Consulting Services Inc., známou pod zkratkou MCS, v roce 1971 Patrickem Hanrattym, který dodával kód společností jako Unigraphics, Computervision nebo Control-Data. Jakmile se počítače staly dostupnější technologií, aplikace CAD se postupně šířila do nových oblastí. Vývoj softwaru CAD pro osobní stolní počítače byl impulsem pro téměř univerzální použití ve všech oblastech konstrukce. [5]

Na začátku 70. let minulého století se výzkum pomalu přesunul z 2D do 3D prostoru. Milníky v tomto výzkumu zahrnují například matematický model NURBS, za kterým stojí Ken Versprille, který tvoří základ pro moderní 3D modelování křivek a povrchů. Dále vývoj jazyka PADL (Part and Assembly Description Language) od Grayera, Langa a Braida, který stanovuje kompletní geometrii tolerovaných mechanických částí, které generují grafická zobrazení a vypočítávají vlastnosti objektů definovaných v tomto jazyce. Software CATIA (Computer-Aided Three Dimensional Interactive Application) byl vydán později v roce 1977 a poprvé přenesl konstruktéry do světa 3D modelování. [7]

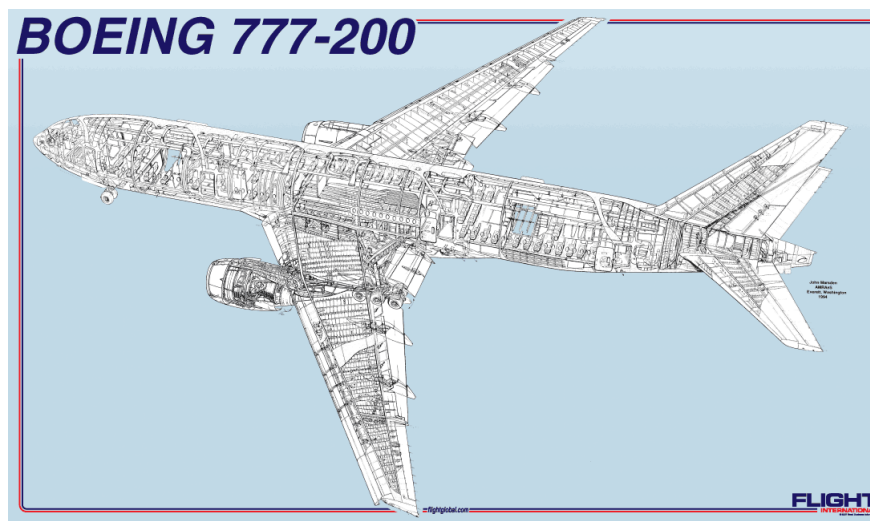
Vznik pracovních stanic UNIX v 80. letech minulého století zapříčinil revoluci na trhu výpočetní techniky, což zasáhlo i oblast CAD. Zatímco před několika lety byl CAD software proprietárním nástrojem pro těžký průmysl, v 80. letech se začaly objevovat komerční CAD systémy v leteckém, automobilovém a lodním průmyslu. Právě představení prvního počítače IBM PC v roce 1981 znamenalo skutečný začátek rozsáhlého přijetí technologie CAD. Následující rok znamenal ještě větší mezník v historii CAD, kterým bylo založení společnosti Autodesk a následné vydání programu AutoCAD, prvního významného CAD programu pro IBM PC. Společnost Autodesk se dostala do podvědomí odborné veřejnosti tím, když AutoCAD vyhrál v roce 1986 cenu pro nejlepší produkt CAD časopisu PC World. Cenu, kterou úspěšně obhájil dalších 10 let. [7]

AutoCAD udával tempo pro vývoj dalších konkurentů v oblasti CAD. CAD software byl však stále převážně založen na 2D. To se však změnilo v roce 1987 vydáním programu Pro/ENGINEER. Tento program byl založen na objemové geometrii a parametrických technikách pro definování dílů a sestav. Program byl určený pro pracovní stanice UNIX, protože tehdejší osobní počítače stále neměly dostatečné schopnosti pro požadované programy CAD. Přepsali se tak pravidla hry, uživatelská rozhraní jiných programů CAD byla v tu chvíli považována za zastaralá. Návrháři nyní mohli nastavit jasné parametry, funkce a vztahy. Jedinou věcí, která v tehdejší době zpomalila tempo parametrického



modelování, byly potíže s investováním času a peněz do školení a převodem starších dat z jiných CAD programů do proprietárního datového formátu Pro/ENGINEER. [6] [7]

Konec 80. let přinesl souboj mezi vývojáři 3D CAD softwaru, cílem bylo srovnat své současné CAD programy na úroveň uživatelského rozhraní a schopností programu Pro/ENGINEER. To připravilo cestu pro 3D jádra určené k modelování těles, jako jsou Parasolid a ACIS, která byla později integrována do nových parametrických CAD programů. Parasolid byl vyvinut společností Shape Data Limited, jejímž současným vlastníkem je Siemens Digital Industries Software, který vyživá jádro i v současnosti ve svých vlastních 3D CAD produktech. Jádro ACIS, vyvinuté společností Spatial, bylo rovněž oblíbené mezi vývojáři 3D CAD softwarů, použití našel i například v softwaru AutoCAD. Komercializace softwaru CAD a pokles proprietárního softwaru vedly vývojáře CAD k obtížím odlišit jejich software od ostatních. Tento pokles proprietárního softwaru také vedl k nárůstu zájmu firem z oblasti letectví a automobilových výrobců, kteří začínají přecházet na CAD software od komerčních prodejců. Například Boeing v roce 1988 oznámil, že CATIA bude použita k návrhu nového letadla 777. Tím se pro vývojáře IBM-Dassault vytvořily tržby v hodnotě 1 miliardy USD. [7] [8]



Obrázek 2: Výřez letadla Boeing 777 [9]

Pro období 90. let bylo příznačným znakem přechod k osobním počítačům, které byli konečně schopné požadovaných výpočtů pro 3D CAD, od pracovních stanic UNIX. Několik uživatelů stále požadovalo výkon procesoru poskytovaný pracovními stanicemi UNIX, většina však byla uspokojena s dostatečným výkonem osobních počítačů. CAD software se tak pomalu začal stávat dostupným pro miliony spotřebitelů, kteří si tuto technologii dříve nemohli dovolit. V roce 1995 byl vydán první významný modelář pro operační systém

Windows – SolidWorks. Byl tak úspěšný, že po pouhých 2 letech jej společnost Dassault Systèmes získala za sumu 320 milionů USD. V roce 1995 rovněž vznikla první verze softwaru Solid Edge, za kterou stojí společnost Siemens Digital Industries Software. Na konci minulého tisíciletí byla rovněž vydána první verze programu Autodesk Inventor, která navázala na úspěchy programu AutoCAD a rychle se stala jedničkou v prodeji 3D CAD softwaru na světě. Většina 3D CAD programů do konce 90. let dosáhla stejného bodu, všechny nabízejí velmi podobné funkce. Tlak na nové inovace ve světě 3D CAD se tak začal zpomalovat. Místo toho se nyní zájem zaměřil na software pro správu produktových dat, využití bylo zřejmé například u zmiňovaného bezpapírovém designu Boeingu 777, vytvořeného pomocí softwaru CATIA. [7]

### **3.2.2 Současnost**

Zatímco poslední dvě desetiletí zahrnovala závod o inovace v 3D CAD, začátek 21. století přinesl v CAD softwaru období udržitelnosti. Spíše než přinášet nový, inovativní software, se prodejci nyní zajímali o správu produktových dat (PDM). Důraz byl kladen na zkrácení doby koncepce, návrhu a výroby. Integrace softwaru CAD a PDM spolu s internetem může poskytnout návrhářům a technikům dokonalý způsob spolupráce a vytváření návrhů časově efektivním a pohodlným způsobem. Prodejci zjistili, že používání PDM a PLM by proto eliminovalo prodloužené doby vývoje a zvýšilo pracovní tok. Pro 21. století je symbolický vývoj výpočetní platformy. Se zavedením počítačů, smartphonů a tabletů ve velkém měřítku, se CAD stal dostupným pro cloudové, webové a mobilní technologie. Nyní je možné, aby návrháři pracovali s CAD programy téměř na jakémkoli počítači, bez ohledu na operační systém. Dostupnost CAD samozřejmě také přinesla zvýšené použití tohoto softwaru veřejností. [7]

K dostupnosti CAD ve 21. století nepochybně přispěl trend cloudových CAD programů. Poprvé se o tom zmínila velká společnost v roce 2010, kdy ji na své akci pod názvem World 2010 představila firma SolidWorks. Trvalo však ještě několik let, než se cloudový CAD stal hlavním tématem v CAD průmyslu. Tento trend od té doby pomohl změnit způsob, jakým funguje celé odvětví CAD. Díky cloudovému CAD mohou návrháři z celého světa současně pracovat na jednom CAD modelu. Autodesk se k tomuto trendu připojil vydáním softwaru Fusion 360 v roce 2013. V roce 2015 jej těsně následoval produkt Onshape, od stejnojmenné společnosti. Dostupnost, kterou přinesl internet a cloudové CAD,

vedlo k rozšíření používání CAD softwaru napříč průmyslovými odvětvími. Původně se CAD převážně používal pouze v těžkém průmyslu. V dnešní době byste se však těžko snažili najít výrobní odvětví, které jej nepoužívá. Tento nárůst použití CAD se v průběhu let zvýšil. Prakticky žádný produkt dnes nevzniká bez použití softwaru CAD, od prvotního návrhu, přes simulace až po výrobu. [7] [10]

V dnešní době jsou systémy CAD kompatibilní se všemi hlavními platformami, ať se jedná o Windows, Linux nebo Mac OS. Některé systémy dokonce podporují více platform. Nevyžadují příliš speciální hardware, pokud nebereme v potaz náročné simulace, či velké sestavy, tam je často potřeba vysokorychlostních a vícejádrových procesorů, stejně jako množství paměti RAM a využití diskretní grafické karty. Současně se také změnila interakce mezi člověkem a strojem. Návrháři obvykle využívají klasickou počítačovou myš a klávesnici pro interakci s CAD programy. Kromě toho, mohou také využít například stylus a grafický tablet, zároveň dochází k rozvoji v interakci mezi rozhraním CAD a člověkem pomocí rozšířené a virtuální reality. [7]

Rozšířená realita, dále jen AR, je technologie, která umožňuje vizualizaci CAD modelů v reálném čase a v reálném prostředí. Současný software AR je schopný využívat zařízení, jako jsou chytré telefony nebo tablety. Uživatel snímá okolí fotoaparátem a program umísťuje přes digitální efekt do prostředí zvolený model. Tato možnost umožňuje návrhářům prohlížet si jejich CAD modely z různých úhlů v reálném světě, ještě předtím, než budou vůbec vyrobeny. Zmíněné propojení s okolím umožňují společnosti jako Augment, přes své vlastní aplikace, které návrhářům umožňují prohlížet na jejich 3D modely vytvořené v aplikacích jako SketchUp, Revit, SolidWorks a dalších CAD softwarů. [7]

Oproti tomu virtuální realita, zkráceně jen VR, ponoří uživatele do simulovaného světa pomocí speciální náhlavní soupravy. V herní komunitě se VR prosadila především díky produktům jako Oculus Rift, PlayStation VR nebo Samsung VR. Své využití má i v oblasti CAD, protože umožňuje návrhářům přímou interakci s modely. Společnosti jako Virtualis nebo Mindesk spolupracují se společnostmi jako jsou Autodesk a SolidWorks na integraci VR do svých softwarových nabídek. [5] [7]

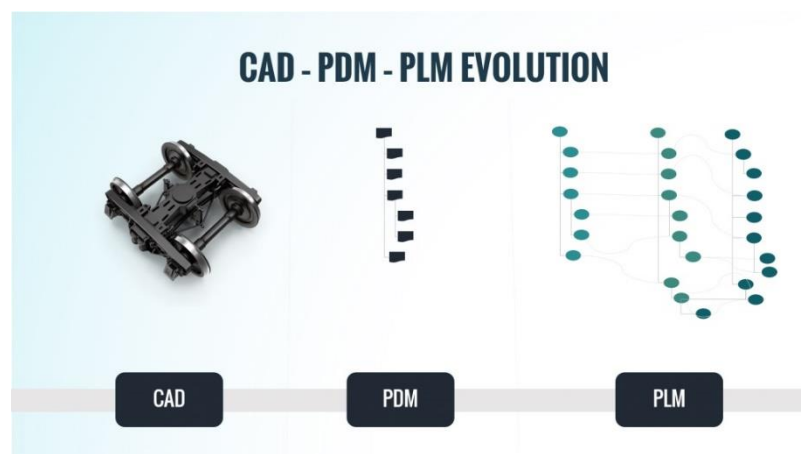
CAD založený na rozšířené a virtuální realitě je trendem, který by mohl mít obrovské dopady na designový průmysl. V budoucnu by tak designéři mohli posílat zákazníkům produkty, na které se lze dívat ve formátu reálného světa pomocí AR, ještě předtím, než je produkt vůbec vyroben. Kromě toho mohou návrháři spouštět svůj oblíbený CAD software,

jako například SolidWorks, s náhlavní soupravou VR a vytvářet modely, jako jsou virtuální sochy, zcela ručně. Rozšířená a virtuální realita samozřejmě musí vyřešit několik neduhů, než bude dokonalá. Jedním z hlavních problémů technologie VR je potřeba náhlavních souprav, které nejsou příliš praktické ani atraktivní pro spotřebitelský trh. [7]

Hlavním nadcházejícím trendem v CAD je koncept technologie, která je schopna předvídat další krok designéra a podle toho sama provést požadované kroky pro tvorbu modelu, toho je dosaženo pomocí umělé inteligence a strojového učení. Tato technologie je známá jako generativní design. Návrháři díky ní mohou vybrat vhodné designové řešení tím, že práci na modelu přenechají na softwaru a jen z výsledků vyberou ideální design. Autodesk v současné době pracuje na programu Dreamcatcher, který dokáže vygenerovat stovky jedinečných návrhů za několik hodin, což pro návrháře znamená značné zkrácení času na tvorbu modelu. To může v příštích letech do určité míry ovlivnit technologii CAD, jelikož nejdůležitějšími aspekty budoucnosti CAD jsou jednoduchost, efektivita a rychlost. [5] [7]

### 3.3 PDM

Nástroje Product Data Management (PDM) slouží společnostem a vývojovým týmům organizovat soubory návrhů produktů a udržovat konzistenci napříč verzemi, zatímco vyvíjejí a aktualizují své produkty, což zajišťuje, že pro každý soubor existuje jedna verze a že je sledována každá změna aktualizace produktu. Systémy PDM tak poskytují jediný zdroj pravdy, robustní řízení verzí a platformu pro spolupráci. Vývojáři se mohou soustředit na vývoj produktů, namísto toho, aby se obávali práce s nesprávnými verzemi souborů nebo chybějící důležité aktualizace. Soubory návrhů produktů poskytují užitečné informace pro různé týmy spojené s celým životním cyklem produktu. [11]



Obrázek 3: Vývoj CAD-PDM-PLM [12]

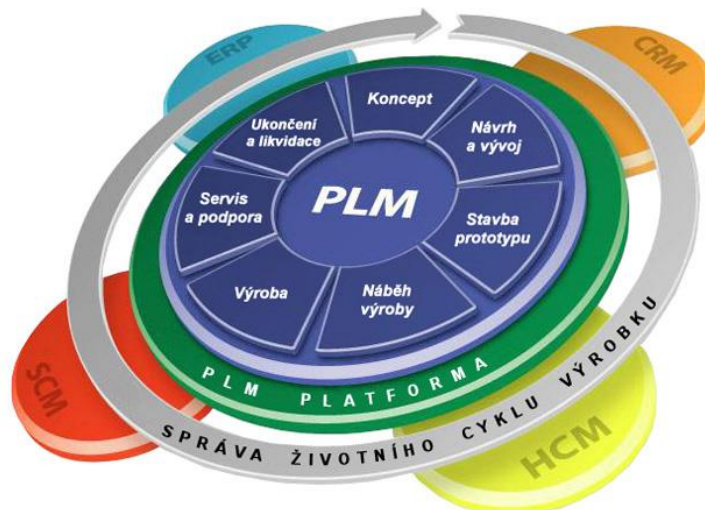
Software PDM obvykle spravuje data související s CAD návrhy. Zahrnuje soubory produktů, které jasně definují specifikace návrhu, například materiál, který má být použit při výrobě. Plány a návrhy produktů procházejí několika iteracemi a změnami, aby splňovaly potřeby spotřebitelů, dodržení stanovených nákladů a cílů proveditelnosti výroby. Protože většina produktů bude mít více částí a souborů, které se navzájem propojují, je důležité udržovat je uspořádané v hierarchických složkách, které nástroje PDM mohou zjednodušit. Udržování aktualizovaných návrhových souborů při zachování předchozích verzí je klíčem k prevenci chyb, vždy je důležité vědět jaké změny kdo a kdy provedl. [11]

Pravidelné aktualizace produktů jsou zásadní pro udržení relevance na dnešním trhu. Skutečná inovace produktu vyžaduje, aby se technické týmy soustředily na využití poznatků od spotřebitelů. Aktualizace návrhových souborů na jednom centrálním místě umožňuje konstruktérům a zúčastněným stranám v technickém týmu ušetřit čas a snadno zaznamenat revize, které by jinak mohly přehlédnout, od drobných úprav až po rozsáhlý redesign. Je důležité si uvědomit, že PDM se primárně zaměřuje na CAD a s ním spojená data. Řeší tak problémy, které vznikají během rané fáze životního cyklu produktu. [12]

### **3.4 PLM**

Počátky systémů životního cyklu výrobku (PLM) se podobně jako u PDM datují do doby, kdy se přecházelo z 2D kreslení na 3D modelování. Stále ve větší míře se začalo spolupracovat na projektech v týmech konstruktérů. Zdokonalení samotných systémů CAD/CAE přineslo možnosti mnohem složitějších návrhů, komplexních řešení výroby nových produktů a rovněž se rozšířili i možnosti inovací. PLM systém tak musel obsahovat možnost určité integrace do jednotlivých CAD systémů. Postupem času i vývojáři CAD systémů objevily výhody PLM a za cílem udržení si zákazníků začali vyvíjet svoje vlastní PLM řešení, které často integrovali do svých CAD programů. [13]

PLM systémy obecně umožňují spravovat veškeré informace o produktech v průběhu celého jejich životního cyklu, od prvotního vývoje, přes realizaci a servis, až k inovaci, popřípadě ekologické likvidaci. Cílem těchto systémů je zabezpečit a spravovat vztahy mezi produkty společnosti, zaměstnanci, procesy, daty a aplikacemi. Většinu organizačních problémů, které vznikají při týmové spolupráci jsou schopny řešit interně, jejich využití pro řešení problémů se dá využít i ve vztahu k zákazníkovi a vůči dodavatelům. [13]



Obrázek 4: Cyklus PLM [14]

PLM systémy jsou schopny spolupráce napříč různými interními a externími týmy, použití tak nachází v oblastech provozu, kvality, nákupu, logistiky, prodeje, marketingu, financí a služeb. Za pomoci vhodného využití PLM systému tak lze dosáhnout vyšší spolupráce a produktivity. Správa životního cyklu produktu má v oblasti výroby dlouhou historii, ale v současné podobě se tento termín obecně týká softwarového řešení a širšího využití nad rámec samotného výrobního procesu. [14] [15]

PLM byl původně navržen tak, aby pomohl konstruktérům spolupracovat na nejnovějších návrzích produktů a kontrolovat informace v průběhu celého životního cyklu produktu. Databáze, se kterými PLM systémy pracovali bývali často uloženy na místních zařízeních (on-premise), řešení PLM se tak zaměřovalo pouze na interní zaměstnance. V současné době se řízení životního cyklu produktu jako metodologie vyvinulo tak, aby zahrnovalo větší část organizace, včetně služeb zákazníkům, marketingu, prodeje, dodavatelů a partnerských kanálů. Hlavním cílem dnešních PLM systémů je být svým uživatelům vždy nablízku a nabídky on-premise řešení se oproti cloudovým software značně snižují. [16]

Software PLM založený na cloudu se liší od svého předchůdce on-premise v tom, že vytváří jediný zdroj pravdy pro urychlení a zlepšení vývoje produktu, umožňuje také sledování dat a procesů, které je vždy dostupné při přístupu k internetu. Dnešní cloudový software PLM aktualizuje změny produktu, pokroky a shodu s průmyslem v reálném čase, což umožňuje včasnou spolupráci mezi všemi odděleními v procesu vývoje produktu bez ohledu na jejich umístění. [16]

Starší PLM řešení byla vytvořena, aby pomohla technikům zvýšit produktivitu, zrychlit dobu uvedení na trh a snížit náklady na produkt. Dnešní software PLM nové generace zahrnuje nové výhody správy životního cyklu produktu v celé organizaci, umožňují například rychlejší odezvu vůči zákazníkům z čehož plyne i větší transparentnost pro zákazníky, vyšší kvalitu produktů, včetně těch komplexních, což pomáhá zvýšit tržby a rychleji dostat nové produkty na trh. Řízení projektů může zahrnovat celý životní cyklus produktu od konceptu až po likvidaci, ale obvykle se používá pro proces vývoje, výroby, zavádění a doručování produktů včas. Zajišťuje, že jsou dodrženy časové osy, v případě potřeby jsou k dispozici zdroje a jsou dodávány produkty. [16]

Software PLM je jen tak dobrý, jako jeho schopnost integrovat procesy a technologie společnosti. PLM by měl zahrnovat návrhový systém CAD s plánováním podnikových zdrojů (ERP) a měly by spolu bezchybně komunikovat. Aby byly výsledky co nejlepší, musí také spolupracovat správa všech vztahů se zákazníky a správa produktových informací (PIM), poskytující nejnovější informace o produktu. [16]

### **3.5 Porovnání 2D a 3D CAD**

Součástí praktické části diplomové práce je tvorba pomocí 2D i 3D CAD programů. Způsob 2D zobrazování lze považovat za tradiční techniku, která se postupně vyvíjela od prvních výkresů, které byli ručně kresleny jen za pomoci papíru a tužky, až po tvorbu výkresové dokumentace díky dedikovaným CAD programům, které jsou schopné efektivně propojit práci s 2D návrhy i 3D modely. [17]

Nevýhodou samostatného 2D zobrazení jsou bezpochyby vyšší nároky na představivost, jelikož se nepracuje s 3D modelem, současně je s tím spjata i nutnost znalostí zásad technického kreslení a normalizace. Tvorba 2D dokumentace za pomoci CAD programů tyto nároky do určité míry snižuje, samotný program uživatele často správně vede a je mnohdy schopný upozornit na případné chyby. Rovněž řada programů nabízí možnosti automatizované tvorby výkresové dokumentace podle zvolených zásad technické normalizace. Pro uživatele to může znamenat větší podíl tvůrčí činnosti na finálním modelu, bez rizika tvorby nevynucených chyb. [17]

Rozvoj 3D modelování jednoznačně zasahuje do současného trhu v oblasti CAD systémů. Bezpochyby má mnohem větší podíl využití, jedná se především o evoluční faktor. Zefektivnění práce a větší možnosti využití jsou jednoznačnými vlivy, které upřednostňují

tvorbu v prostředí 3D CAD. Oproti 2D modelování má 3D modelování mnoho dalších výhod. Samotný prostorový model má schopnost uživateli co nejvíce zjednodušit představu o finálním výrobku, není tak zaměřený pouze na svoji představivost a kvalitu případné dokumentace, která je zobrazena do různých pohledů a řezů. Další výhodou je schopnost další práce s modelem, příkladem může být využití analýz pro další zpracování a kontrolu, které vedou až k finální výrobě. [17]

Nelze však opomenout faktor ceny, ta se u programů se zaměřením pouze na 2D CAD pohybuje mnohem níže, než je tomu u programů podporující práci se 3D modely. Často i samotní výrobci nabízejí své 2D CAD produkty zdarma, jsou si vědomi omezení které jejich software představuje a do určité míry to i pro uživatele bývá jen pomyslný první krok, od kterého se posléze přesouvají na složitější a obsáhlejší CAD produkty nabízející 3D modelaci. V budoucnu tak společnosti mohou počítat s tím, že tito uživatelé budou preferovat právě jejich produkty, nikoliv ty konkurenční. [17]

### **3.6 2D CAD Software**

I přes mnohem větší podíl programů zaměřených na 3D modelování, stále zde existuje i trh pro 2D CAD. Účelem dobrého výkresu je předat informace. Práce s 3D CAD programy může přinášet jasný pohled například na finální produkt, ne vždy to však musí být ten nejvhodnější způsob pro prezentaci vlastního návrhu. Jedním z problémů 2D výkresů je fakt, že si uživatel musí umět představit 3D model ve své hlavě. Toto není zcela spolehlivé řešení, které může vést k případným chybám. U malých projektů bývá 2D návrh často rychlejší než 3D modelace, pokud je tedy čas zásadní veličinou a není potřeba později vyžadovat komplikované 3D modely nebo vykreslování, lze považovat 2D CAD za správné řešení. Při volbě CAD programu vždy záleží na návrhu, který uživatel zrovna řeší. Je důležité přemýšlet dopředu a zvažovat všechny možnosti řešení. Pro návrhy elektrických zapojení je 3D model spíše na obtíž, ale například pro prezentaci návrhů interiérů se dají výborně využít varianty 2D i 3D. [18]

Hlavní pole využití pro 2D CAD software bývají počáteční fáze návrhů nebo projekty v menším měřítku, v závěrečných fázích plánování návrhů a pro projekty ve velkém měřítku nabízí 3D CAD mnohem více možností, proto je pro uživatele důležité správně odhadnout rozsah práce. Přestože je 2D CAD software zpravidla schopen konstruovat trojrozměrné perspektivy, software často neobsahuje možnosti vykreslování. Místo toho musí být



perspektiva předána do jiného programu, aby se vykreslování dokončilo, většina 3D CAD programů mezitím dokáže snadno sama vykreslit věrné modely. [19]

### 3.6.1 AutoCAD

Software AutoCAD je produktem společnosti Autodesk. Autodesk, Inc. je americká nadnárodní softwarová společnost, za kterou stojí softwarové produkty a služby pro architekturu, strojírenství, stavebnictví, výrobu, média, vzdělávání a zábavní průmysl. Produkty společnosti Autodesk jsou dostupné ve více než 85 zemích a v 18 jazycích. Autodesk má zastoupení například ve Švýcarsku, Rakousku, Španělsku, Německu, Anglii, Japonsku, Austrálii a rovněž i v České republice. Sídlo společnosti se nachází ve městě San Rafael v Kalifornii, několik kilometrů severně od San Franciska. [20] [21]

Společnost Autodesk byla založena v roce 1982 Johnem Walkerem, který byl spoluautorem prvních verzí softwaru AutoCAD, tento software lze stále považovat jako vlajkovou loď společnosti, především co se týče CAD programů. Mezi hlavní programy z portfolia společnosti Autodesk patří kromě zmiňovaného AutoCADu třeba software Inventor, ten je zaměřený především na 3D CAD modelování a oproti AutoCADu disponuje i různými simulacemi, rozšířenou dokumentací a vizualizací pro vytvořený model. Pro oblast CAD tvorby je často využíván i cloudový software Fusion 360, ten disponuje obsáhlými možnostmi v oblasti CAD/CAM/CAE a je vhodný především pro větší týmy designerů, kteří se díky této platformě mohou podílet na společné tvorbě modelů, či sestav. V oblasti designu nelze vynechat ani software Revit, který používají primárně architekti. Kromě klasického návrhu staveb je schopný uživatelům umožnit plánování, konstrukci a správu budovy i před jejím postavením. Autodesk současně stojí za programy pro tvorbu 3D grafiky, jako například software 3ds Max, nebo Maya. Oba tyto programy mají využití pro různé počítačové modelování, efekty, animace a často jsou používány i k tvorbě počítačových her, zároveň nacházejí své využití i ve filmových studiích po celém světě. [21] [22]

Současné verze AutoCAD umožňují rychlou práci s 2D CAD návrhy a jednoduché možnosti 3D navrhování. Uživatelům umožňují propojení s cloudovou platformou přes uživatelské Autodesk ID, nabízí se tak možnosti šíření návrhů například v organizaci nebo i pro veřejnost. Použití programu AutoCAD je poměrně široké, své využití nachází v mnoha různých průmyslových odvětvích. Ve strojírenství je možné jej použít k vytváření součástí z výrobních procesů, k navrhování dílů motorů, robotů a dalších inovativních objektů.

V elektrotechnice své využití nachází například při mapování elektrických systémů a jejich zapojení, ale využití nachází i ve stavebnictví. [23]

Společnost Autodesk je velmi aktivní v oblasti rozvíjení a šíření studentských programů a pod studentskou licenci tak lze legálně získat i právě zmiňovaný software AutoCAD, stejně jako několik jiných významných programů jako je Inventor, Revit, Maya nebo 3ds Max. [24]

Nabídka produktů AutoCAD čítá možnosti dvou hlavních verzí, konkrétně se jedná o původní verzi AutoCAD a její odlehčenou verzi AutoCAD LT. Verze AutoCAD LT je limitovaná pouze na tvorbu 2D geometrie a dokumentace, oproti tomu originální verze AutoCAD nabízí navíc možnosti 3D modelování, vyšší přizpůsobení pomocí doplňkových aplikací a rozhraní, nastavení a sledování standardů CAD a přístup ke speciálním sadám nástrojů například pro stavebnictví, strojírenství nebo elektroinstalace. Možnosti a případné limitace programů se odrazily na ceně, která je v tabulce 1. Zmiňované ceny jsou za roční licenci pro zvolený produkt. [25]

Tabulka 1: AutoCAD, Porovnání ceny

<b>Produkt</b>	<b>Cena včetně DPH</b>
AutoCAD	62 993 Kč
AutoCAD LT	14 339 Kč

### 3.7 3D CAD Software

3D CAD je technologie, kterou konstruktéři, vývojáři produktů a návrháři používají k vytváření virtuálních trojrozměrných objektů. Pomocí 3D CAD mohou konstruktéři dynamicky vytvářet a upravovat každý detail modelu, dílu nebo sestavy. 3D CAD software usnadňuje a automatizuje další aspekty produktového inženýrství, jako jsou náčrty, simulační testování, výroba, správa dat, ale i animace a další. Tyto trojrozměrné modely lze použít v simulačních studiích k předpovědi, jak bude model reagovat na stresové a environmentální faktory, ty lze posléze vykreslit a vytvořit fotorealistické obrázky například pro použití v prodejních a marketingových materiálech nebo lze odeslat podrobné výkresy pro výrobu, či v případě aditivní výroby lze CAD soubor odeslat přímo na 3D tiskárnu. [26]

Tradičně existují dva hlavní přístupy k vytváření a úpravě geometrie ve 3D CAD programech: parametrické modelování a přímé modelování. V parametrickém modelování

je znatelná struktura s pořadím funkcí, ze které je možné vyčíst, jak modely reagovali na změny nebo úpravy. To vytváří předvídatelné výsledky z úprav základních náčrtů pomocí přesných parametrů ke každé funkci. Přímé modelování oproti tomu neudrží historii funkcí ani nezaznamenává, jak byl model vytvořen. Součást není tvořena žádnými prvky náčrtu jízdy. Úpravy se provádějí jednoduchým výběrem toho, co se chce změnit. [26]

CAD, ale i klasické 3D modelování umožňuje konstruktérům vytvářet realistické počítačové modely dílů a sestav. Tyto modely lze posléze vytisknout na 3D tiskárně, poslat k úpravě na CNC stroj nebo je také použít ke spuštění složitých simulací. Před vytvořením jakýchkoli fyzikálních modelů lze simulovat širokou škálu parametrů, jako je pevnost nebo teplotní odolnost, což umožňuje mnohem rychlejší a levnější postup výroby. [27]

Objemové modelování vytváří objemové 3D modely, jako by se jednalo o skutečné součásti, s logickým pracovním tokem, který je podobný procesům, které by byly použity k výrobě součásti. Některé z těchto operací zahrnují operace tažení, vrtání či tvorbu závitů. Objemové modely se mohou navzájem protínat, spojovat a odečítat což ve výsledku vytváří požadovanou součást. Nejčastější forma tvorby modelů, je již zmiňované parametrické modelování, změny nebo parametry se ukládají v každé fázi procesu modelování a lze je kdykoli během návrhu upravovat. To je velmi užitečné, protože umožňuje rychlé úpravy vlastností modelu, aniž byste museli díl vytvářet úplně od začátku. Modelování sestavy je také důležitou fází modelování těles, protože umožňuje sestavovat jednotlivé součásti dohromady a vytvářet složité modely. Sestavy lze použít ke vložení standardizovaných součástí, jako jsou spojovací prvky nebo ložiska, které byly dodány přímo od výrobců. Pohybové prvky lze také použít na sestavy, což umožňuje použít podrobnou analýzu pohybu k vyhodnocení mechanického výkonu návrhu. [27]

### **3.7.1 SolidWorks**

Společnost SolidWorks byla založena v prosinci 1993 Jonem Hirschtickem, který pro financování projektu využil svůj 1 milion dolarů, který vydělal se svými spolužáky z Massachusettského technologického institutu díky výhrám v kasinech, za pomoci technik jako je počítání karet při hře blackjack. Hirschtick poté přijal tým inženýrů, kteří byli pověřeni cílem vytvořit 3D CAD software, který měl být přístupný, cenově atraktivní a dostupný na platformě Windows, namísto do té doby velmi používané platformy UNIX. Nedlouho poté, v listopadu 1995, byla vydána první verze softwaru SolidWorks. Jednalo se

o první významný modelář pro Windows. To se ukázalo jako obrovský krok v následném vývoji CAD. Zatímco například AutoCAD byl vydán mnohem dříve, SolidWorks přinesl něco nového, revolučním faktorem byla právě nepříliš složitá možnost 3D modelování. V důsledku toho se postupně 3D CAD stal ústředním bodem 90. let. SolidWorks byl tak působivý, že ho roku 1997 za sumu 320 milionů dolarů získala společnost Dassault Systèmes, nejlépe známá pro svůj software CATIA. Jon Hirschtick zůstal u vývoje dalších 14 let, později odešel založit další známou společnost Onshape nabízející cloudový CAD. Zatímco SolidWorks byl původně zaměřen na strojírenství, od té doby se rozvětvil a pokrývá celou řadu průmyslových odvětví, od výroby, přes stavebnictví až po letectví. [28]

Současné verze SolidWorks využívají pro vytváření modelů a sestav parametrického přístupu, založeného na vlastnostech, které původně vyvinula společnost PTC, stojící například za CAD programy Creo nebo Pro-Engineer. Jednotlivé parametry odkazují na omezení, jejichž hodnoty určují tvar nebo geometrii daného modelu nebo sestavy. Parametry mohou být buď číselné, jako jsou délky čar nebo průměry kruhů, nebo geometrické, což jsou tečny, rovnoběžky, vodorovné nebo svislé čáry atd. Numerické parametry lze navzájem spojovat pomocí vztahů, které jim umožňují zachytit záměr návrhu. Vztahy se používají k definování atributů, jako je tečnost, rovnoběžnost, kolmost a soustřednost. Parametrická povaha SolidWorks znamená, že rozměry a vztahy řídí geometrii, nikoli naopak. Kóty v náčrtu lze ovládat samostatně nebo pomocí vztahů k jiným parametrům uvnitř nebo vně náčrtu. [29]

V sestavě jsou analogickými vztahy skici vazby. Stejně jako vztahy náčrtu definují podmínky jako tečnost, rovnoběžnost a soustřednost s ohledem na geometrii náčrtu, vazby sestavy definují ekvivalentní vztahy s ohledem na jednotlivé součásti nebo komponenty, což umožňuje snadnou konstrukci sestav. SolidWorks rovněž obsahuje své pokročilé spojovací funkce, jako například spojky převodů a vaček, které umožňují modelovaným sestavám převodů přesně reprodukovat rotační pohyb skutečného soukolí. Integrovaný modul pro technickou dokumentaci poté obsahuje většinu formátů a standardů papíru (ANSI, ISO, DIN, GOST, JIS, BSI a SAC). [29]

SolidWorks lze považovat za CAD program vyšší úrovně, který je hojně využíván ve velkých společnostech a svými možnostmi nabízí uživatelům opravdu široké spektrum využití, i když svoje zaměření na strojírenství svými funkcemi nijak nepopírá. Nové verze nadále přizpůsobují svá řešení tak, aby zahrnovala nové funkce založené na zpětné vazbě

uživatelů. Nové verze vždy obsahuje řadu vylepšení, mezi které často patří vylepšený výkon, zefektivnění pracovních postupů a propojení s cloudovou platformou 3DEXperience. [30]

Hlavní nabízené produkty SolidWorks jsou nabídky označené jako Professional a Premium. Obě verze nabízejí široké CAD knihovny dílů, základní nástroje analýzy, propojení s CAM nebo možnosti reverzního inženýrství. Produkt Premium navíc nabízí rozšířené možnosti analýzy, podporu životního cyklu produktu a vyšší možnosti editace pro specifické strojírenské součástky. Nevšední přístup má SolidWorks u nabídky své studentské edice CAD softwaru. Na rozdíl od mnoha jeho konkurentů nenabízí své produkty zdarma, ale distribuuje je za sníženou cenu oproti svým hlavním produktům. Pokud je student chce získat zdarma, musí být jeho škola nebo vzdělávací instituce zařazena do programu SolidWorks Education. Obdobně jako u jiných CAD programů je i studentská licence SolidWorks oproti běžným produktům částečně omezená. Ceny zmíněných produktů jsou v tabulce 2. Studentská verze se nabízí za poplatek pro roční licenci, pro produkty SolidWorks Professional a Premium jsou nabízené ceny za doživotní licence. Existují i nabídky pro měsíční, či roční předplatné licencí, jejich ceny se však vždy odvíjejí od nabídky jednotlivých prodejců. Nelze je tak pro naše porovnání standardizovat. [31] [32] [33]

Tabulka 2: SolidWorks, Porovnání ceny

<b>Produkt</b>	<b>Cena bez DPH</b>
SolidWorks Professional	85 532,95 Kč
SolidWorks Premium	171 172,95 Kč
<i>SolidWorks Student Edition</i>	<i>2 320,09 Kč</i>

Ceny byly převedeny z ekvivalentů uvedených v USD dle kurzu devizového trhu ČNB pro USD/CZK ke dni 3.5.2021.

### 3.7.2 SpaceClaim

SpaceClaim je produkt americké společnosti Ansys, Inc., která byla založena v roce 1970 Johnem Swansonem, její sídlo se nachází v Canonsburgu v americkém státě Pensylvánie. První komerční verze softwaru Ansys byla vydána v roce 1971. V té době byl software tvořen krabicemi děrovacích karet a program byl obvykle spuštěn přes noc, výsledky se poté analyzovali následující ráno. S postupem času a rozvojem osobních počítačů se produkty společnosti Ansys začali dostávat od primárně velkých společností,

kteře programy společnosti Ansys využívali k počítání různých simulací, až k běžným uživatelům. [34]

Pro oblast CAD je důležitý rok 2005, kdy vzniká samostatný oddíl SpaceClaim Corporation, který má za cíl vyvíjet 3D CAD software pro modelování těles pro strojírenství. První aplikace byla vydána roku 2007 a používala vlastní přístup k modelování těles, kde se koncepty designu vytvářejí tahem, pohybem, vyplňováním a opětovným použitím 3D tvarů. Po prvotní verzi softwaru následovala řada vylepšení výkonu, aby si společnost držela krok s vývojem ve výpočetní technice. Společnost Ansys také začala svůj software integrovat s konkurenčními programy CAD, například od známých společností, mezi které patří i Autodesk. [34] [35]

Současné verze SpaceClaim přinášejí unikátní uživatelské rozhraní, technologie modelování a univerzální sady nástrojů SpaceClaim, které pomáhají konstruktérům vytvářet a upravovat importovanou geometrii, bez složitostí spojených s tradičními systémy CAD. Při práci s existujícími CAD modely můžete zrušit rysy a zjednodušit geometrii pomocí automatizovaných snadno naučitelných nástrojů. [36]

SpaceClaim poskytuje uživatelům nástroje pro urychlení přípravy geometrie pro simulaci, ať se jedná o pevnostní analýzy nebo ověření 3D modelů které jsou unikátní vysokým počtem dílů z různých typů materiálů. SpaceClaim je také vhodný pro analýzu a korekci chyb v geometrii tělesa, což uživatelům umožňuje ještě více se soustředit na jejich simulace a produkci výsledného modelu na samostatné pracovní stanici. Stejně tak efektivně je SpaceClaim schopný rozpoznat případné chyby například u nekorektně uloženého souboru. Výhodou programu SpaceClaim je rovněž možnost práce s různými formáty z jiných CAD programů. Příkladem mohou být modely či sestavy ze systémů jako SolidWorks, Inventor, NX, PRO/Engineer, Creo Parametric, CATIA, ACIS, Parasolid nebo Rhinoceros. Podporované formáty jsou například STEP, IGES, ECAD, CGR, DWG, DXF, STL, OBJ, XAML, VRML a 3D PDF. [37]

Obdobně jako SolidWorks lze i SpaceClaim zařadit mezi CAD programy vyšší úrovně. Svými možnostmi často přesahuje konkurenci a díky propojení s ostatními produkty společnosti Ansys je z něj velmi žádaný produkt pro uživatele, kteří mají v plánu své modely dále analyzovat. [37]

Nabídka produktu SpaceClaim lze rozdělit do třech základních variant – Essentials, Standard a Ultimate. Produkt Essentials obsahuje základní verzi softwaru SpaceClaim, pro

jednoduché modelování 3D součástí a sestav. SpaceClaim Standard nabízí navíc simulace v reálném čase pomocí prostředí Ansys Discovery Live, podporuje také úpravu STL souborů. Verze Ultimate poté nabízí navíc možnosti simulací tekutin, teploty a strukturální analýzy, za pomoci prostředí Ansys AIM a Ansys Discovery Live. Možnosti těchto verzí jsou reflektovány v ceně produktů, která je v tabulce 3. Uvedené ceny jsou za roční licenci na zvolený produkt. [38]

Tabulka 3: SpaceClaim, Porovnání ceny

<b>Produkt</b>	<b>Cena bez DPH</b>
Ansys SpaceClaim Essentials	26 334,30 Kč
Ansys SpaceClaim Standard	65 942,80 Kč
Ansys SpaceClaim Ultimate	132 099,70 Kč

Ceny byly převedeny z ekvivalentů uvedených v USD dle kurzu devizového trhu ČNB pro USD/CZK ke dni 3.5.2021.

### 3.8 FEM

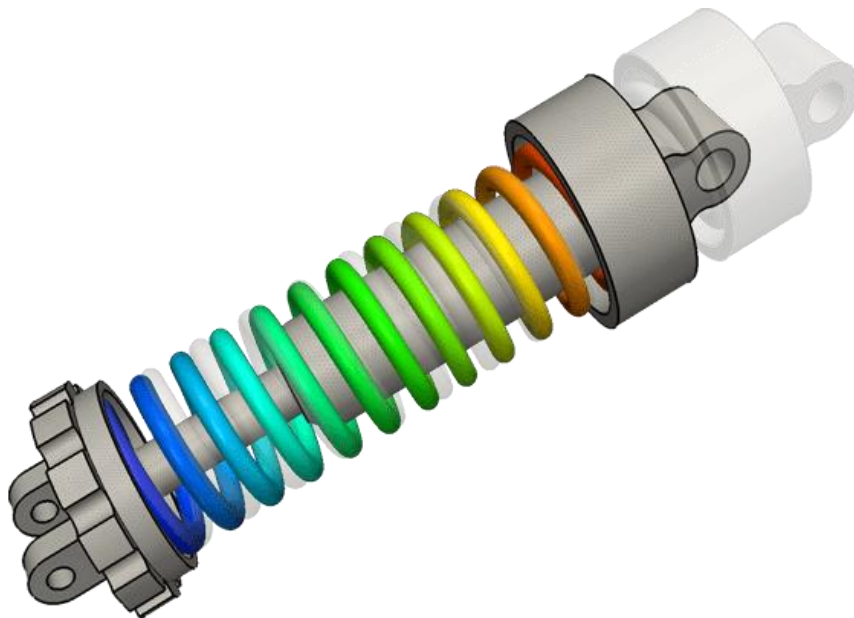
Metoda konečných prvků, anglicky Finite Element Method (FEM) je numerická technika používaná k provádění analýzy konečných prvků, známé jako Finite Element Analysis (FEA) daného fyzikálního jevu. Pro komplexní pochopení a kvantifikaci jakýchkoli fyzikálních jevů, kterými jsou například chování struktur nebo tekutin, tepelný přenos, šíření vln a růst biologických buněk, je třeba využít znalostí matematiky. Většina z těchto procesů je popsána pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Aby však počítač mohl tyto rovnice vyřešit, byly v posledních několika desetiletích vyvinuty numerické techniky a dnes je jednou z těch nejvýznamnějších právě metoda konečných prvků. [39]

Metoda konečných prvků začala s významným příslibem při modelování několika mechanických aplikací souvisejících s letectvím a stavebnictvím. Aplikace metody konečných prvků teprve v současnosti začínají dosahovat svého plného potenciálu. [39]

Ačkoli metoda konečných prvků není vázána na konkrétní typ fyzikálního problému, její hlavní oblastí použití je strukturální analýza pevných látek. Strukturální analýza může zahrnovat různé typy zatížení a scénáře použití, ale jejím hlavním účelem je předpovědět, zda daná součást nebo struktura bezpečně vydrží síly na ni působící. Toho je dosaženo pohledem na stav součásti z hlediska napětí a přetvoření. Maximální hodnoty získané

jakoukoli metodou (například FEM) jsou porovnány s povolenými hodnotami, aby se zjistilo, zda odpovídají bezpečnostnímu rozsahu. Tyto povolené hodnoty jsou většinu času specifikovány designovým kódem, jako je ASCE, ASME, Eurokód atd. [40]

Typické případy použití FEA jsou například ocelové nebo železobetonové konstrukce, pro budovy a jiné civilní aplikace. Dále také průmyslová zařízení, jako jsou tlakové nádoby, potrubí, kotle, některá výrobní zařízení, jako jsou mlýny, formy, nástroje atd. Své využití nachází také v dopravě, například v automobilovém průmyslu se softwarové simulace FEA provádějí za účelem posouzení strukturní bezpečnosti navržených komponent, jako jsou podvozky, zavěšení kol, karoserie atd. Jednou ze zajímavých aplikací jsou virtuální nárazové testy, kde se provádí dynamická simulace k předpovědi deformace a absorpce energie proti nárazu, nebo testy odpružení podvozku. [40]



Obrázek 5: Strukturní analýza odpružení, kritérium napětí von-Mises [40]

### 3.8.1 Workbench & Mechanical

Software Workbench a Mechanical jsou stejně jako SpaceClaim produkty společnosti Ansys, Inc. Zaměření produktů je především na FEM simulace, historie vývoje těchto produktů je oproti zmiňovanému SpaceClaim mnohem bohatší. Již během 80. let minulého století byly verze softwaru Ansys schopné simulací elektromagnetismu, posléze ve spolupráci se společností CompuFlo, která stojí za programem FLOTRAN, byl Ansys schopný vlastních jednoduchých simulací proudu tekutin. [34]



V roce 1996 společnost Ansys uvedla software pro konstrukční analýzu DesignSpace, produkt simulace pádu LS-DYNA a samostatný simulátor Ansys Computational Fluid Dynamics pro výpočet dynamiky tekutin. Ansys také přidal podporu paralelního zpracování pro PC s více procesory. Verze 6.0 hlavního produktu Ansys byla vydána v prosinci 2001, ta poprvé provedla praktické modelování ve velkém měřítku [34]

Historicky významným vydáním byla verze 8, zveřejněna v roce 2005. Představila software Ansys pro interakci tekutin a struktur, který simuluje jejich vzájemné působení. Společnost Ansys rovněž vydala své softwarové produkty Probabilistic Design System a DesignXplorer, které se zabývají pravděpodobnostmi a náhodností fyzických prvků. V roce 2009 byla vydána první verze samostatného softwaru Workbench. Společnost Ansys poté začala postupně stále více konsolidovat funkce do tohoto softwaru. [41]

Ansys Workbench v současnosti spojuje tradiční řešení společnosti a její funkce před a po zpracování do jedné integrované platformy. Vytváření a manipulace geometrie je také plně propojena s Workbench. Ovládání projektu je centralizováno ve grafické oblasti drag-and-drop Project Schematic. Řízení projektu může zahrnovat řetězení analýz nebo propojení v rámci disciplíny. Umožňuje opětovné použití prvků pracovního toku, jako jsou materiály, geometrie nebo nastavení analýzy. Multidisciplíny lze navíc propojit prostřednictvím jejich oken ve schématu. [42]

Ansys Mechanical je dynamická platforma, která využívá analýzu konečných prvků (FEA) pro statickou analýzu. Mechanical je dynamické prostředí, které má kompletní škálu analytických nástrojů od přípravy geometrie pro analýzu až po připojení další fyziky pro ještě vyšší přesnost a integritu. Intuitivní a přizpůsobitelné uživatelské rozhraní umožňuje konstruktérům na všech úrovních rychle a spolehlivě získat výsledky jejich analýz. Mechanical je schopen pokrýt potřeby analýz pro lineární dynamiku, modální analýzu, harmonické nebo náhodné vibrace. Dále lze provádět akustické simulace za účelem porozumění vibroakustického chování systémů, s nebo bez strukturního předpětí. Při překročení lineárních elastických materiálů můžete simulovat chování materiálů, které procházejí plastickou nebo dokonce hyperelastickou deformací (materiály jako guma a neopren). [43] [44]

V rámci vzdělávání nabízí pro studenty společnost Ansys bezplatně svůj balík programů Ansys Student. Tento balík je založený na softwaru Ansys Workbench, dále zahrnuje Ansys Mechanical, Ansys CFD, Ansys Autodyn, Ansys SpaceClaim a Ansys

DesignXplorer. Jedná se o nejpoužívanější produkty společnosti, které nabízí kompletní možnosti analýzy FEM, CFD, deformace a selhání (Autodyn) a analýzu spolehlivosti/robustnosti (DesignXplorer). Rovněž balík obsahuje i již zmiňovaný 3D CAD software SpaceClaim. [45]

Produkty Workbench a Mechanical se mimo studentskou verzi distribuují v balíku programů Ansys Mechanical Enterprise. Součástí licence Mechanical Enterprise je také již zmiňovaný SpaceClaim, simulační software proudění tekutin Fluent nebo program pro správu životního cyklu produktu Ansys nCode DesignLife. Často je licence pro Mechanical Enterprise spojena s využitím produktu Ansys HPC, což značí zkratku pro High-Performance Computing. Tato licence nabízí uživatelům zakoupení dodatečných výpočetních jader pro realizace jejich úloh. Docílí se tak zrychlení simulačního procesu a je tak umožněna možnost simulace celého systému místo jedné části. Počet jader závisí na počtu zakoupených licencí, například na jednu licenci je nabízeno 8 jader, pro dvě licence 32 jader, pro tři licence 128 jader atd. Ceny licencí a ročních poplatků za Ansys Mechanical Enterprise a Ansys HPC jsou v tabulce 4. [46] [47]

Tabulka 4: Ansys Mechanical Enterprise, Porovnání ceny

<b>Produkt</b>	<b>Cena bez DPH</b>
Ansys Mechanical Enterprise – Licence	~ 1 070 500 Kč
Ansys Mechanical Enterprise – Roční poplatek	~ 214 100 Kč
Ansys HPC – Licence	~ 428 200 Kč
Ansys HPC – Roční poplatek	~ 85 640 Kč

Ceny byly převedeny z ekvivalentů uvedených v USD dle kurzu devizového trhu ČNB pro USD/CZK ke dni 3.5.2021.

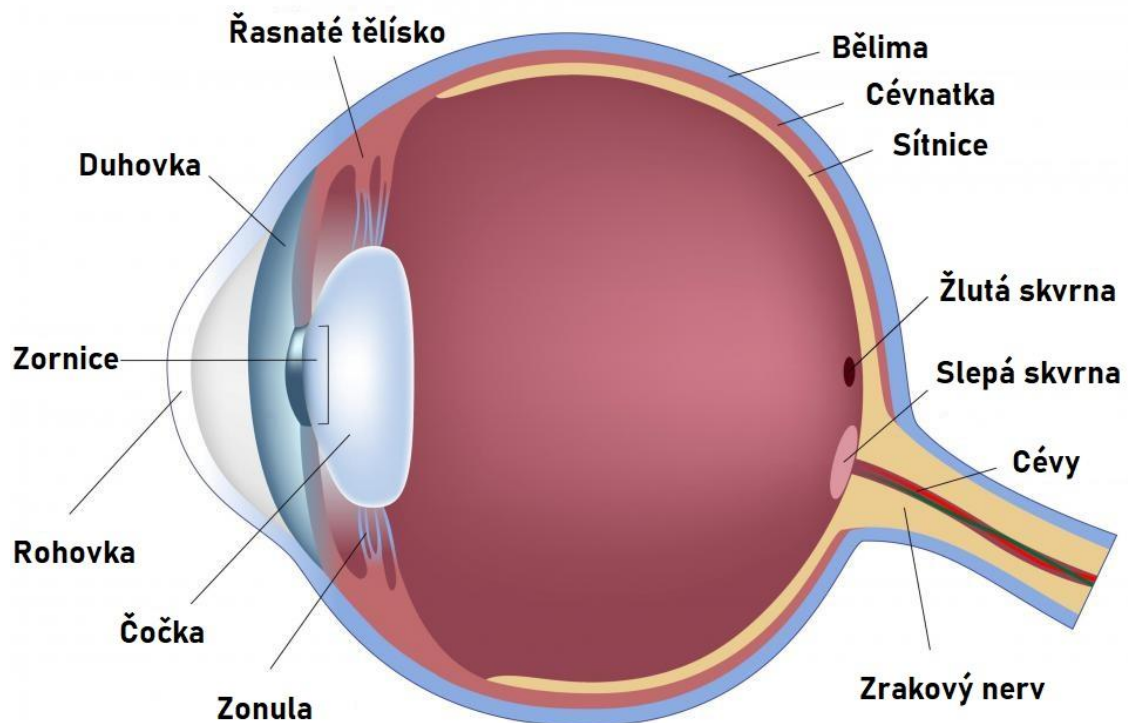
### 3.9 Oftalmologie

Oftalmologie je obor medicíny a chirurgie, který se zabývá diagnostikou a léčbou očních poruch. Jedním z cílů v praktické části je tvorba 3D modelu oka a modelace torické nitrooční čočky, na které se dále testují její vlastnosti pomocí FEM analýz. [48]

### 3.9.1 Lidské oko

Lidské oko je smyslový orgán, který reaguje na světlo a umožňuje vidění. Fotoreceptivní buňky, respektive tyčinky a čípky, nacházející se v sítnici, jsou schopné detekovat viditelné světlo a přenášet tuto informaci dále do mozku. Oči tak pouze signalizují informace, které využívá mozek k vyvolání vnímání barvy, tvaru, hloubky, pohybu a dalších vlastností. [49]

Pro lepší představu a orientaci byla vytvořena grafika znázorňující jednotlivé hlavní části lidského oka, které jsou dále popsány v následujících kapitolách.



Obrázek 6: Anatomie oka

#### 3.9.1.1 Bělima

Bělima, latinsky sclera, je neprůhledná, vláknitá, ochranná vnější vrstva lidského oka obsahující hlavně kolagen a některá důležitá elastická vlákna. U lidí a několika dalších savců je celá bělima bílá, kontrastuje tak s barevnou duhovkou, ale u některých jiných savců je viditelná část bělimy odpovídá barvě duhovky, takže bílou část není běžně vidět. U dětí je bělima tenčí a vykazuje část podkladového pigmentu, má také mírně namodralou barvu.

U starších lidí mohou naopak tukové usazeniny na očním bělmu vyvolat mírně nažloutlou barvu. Lidé s tmavou kůží mohou mít přirozeně ztmavenou bělimu, což je výsledkem pigmentace melaninu. [50] [51]

#### 3.9.1.2 Rohovka

Rohovka, latinsky cornea, je průhledná kopulovitě zakřivená vrstva pokrývající přední část oka, která zakrývá duhovku, zornici a přední komoru. Rohovka je součástí bělimy a dohromady jsou odborně nazývány tunica externa bulbi. Rohovka spolu s přední komorou a čočkou láme světlo, přičemž rohovka tvoří přibližně dvě třetiny celkové optické mohutnosti oka. Rohovka může být přetvářena chirurgickými postupy, jako je například operace LASIK. Rohovka má jako součást optického systému oka největší lomivost, její refrakční hodnota je přibližně 43 dioptrií. Zatímco rohovka výrazně přispívá k zaostřovací síle oka, její ohnisko je pevné. Rohovkou neprocházejí žádné krevní cévy, proto je vyživována výměškem slzného aparátu a také komorovou vodou z přední oční komory. [50]

#### 3.9.1.3 Duhovka

Duhovka, latinsky iris, je orgán v oku. Spolu s čočkou odděluje přední a zadní komoru oční. Barva očí je definována barvou duhovky. Uprostřed duhovky se nachází kruhový otvor zvaný zornice, latinsky pupilla. Zornici lze chápat jako otvor, v němž je umístěna čočka. Za velikost zornice a celkové řízení jejího průměru je odpovědná právě duhovka, řídí tak množství dopadajícího světla na sítnici. Další funkcí duhovky je ohraničení předního a zadního segmentu oka. [50]

#### 3.9.1.4 Zonula

Zonula, známá také jako Zinnův proužek, latinsky zonula ciliaris, je prstenec vláknitých pramenů, který spojuje řasnaté tělíčko s čočkou oka. Tato vlákna se někdy souhrnně označují jako suspenzní vazy čočky. Svůj název získal podle německého anatoma Johanna Gottfrieda Zinna. [50] [52]

### 3.9.1.5 Čočka

Čočka, latinsky *lens crystallina*, je průhledná bikonvexní struktura v oku, která spolu s rohovkou pomáhá lámat světlo, aby mohlo být zaměřeno na sítnici. Princip funkce je podobný funkci uměle vyrobených kontaktních čoček. Refrakční hodnota čočky v jejím přirozeném prostředí je přibližně 18 dioptrií, což zhruba odpovídá jedné třetině celkové síly oka. Hlavní funkcí čočky je akomodace, to je proces, který zvětšuje zakřivení čočky a pomáhá k zaostření blízkých předmětů na sítnici oka. [50] [51]

### 3.9.1.6 Cévnatka

Cévnatka, latinsky *choroidea*, je vaskulární vrstva oka, která obsahuje pojivové tkáň a leží mezi sítnicí a bělimou. Cévnatka je nejsilnější v krajní zadní části oka (0,2 mm), zatímco v ostatních oblastech se zužuje až na 0,1 mm. Cévnatka umožňuje vyživování hlubokých vrstev sítnice a také napíná řasnaté tělísko a pomáhá tak udržet klidové zaostření oka na dálku. Anatomicky je to součást živnatky, ta se nachází mezi bělimou a sítnicí a v přední části oka přechází v řasnaté tělísko. V lidském oku je živnatka i přes svoji tenkost plošně největší složkou stěny oční koule. [50]

### 3.9.1.7 Sítnice

Sítnice, latinsky *retina*, je vnitřní tenká vrstva oka. Její hlavní funkcí je snímání a předzpracování světelných signálů přicházejících na sítnici skrze čočku. Oční optika vytváří soustředěný dvojrozměrný obraz vizuálního světa na sítnici, která převádí tento obraz na elektrické neurální impulsy do mozku, aby vytvořil celek vizuálního vnímání. [50] [51]

Nervová sítnice se skládá z několika vrstev neuronů propojených synapsemi a je podporována vnější vrstvou pigmentovaných epitelálních buněk. Primárními buňkami snímajícími světlo v sítnici jsou fotoreceptorové buňky, které jsou dvou základních typů. Jedná se o tyčinky a čípky. Tyčinky fungují hlavně při slabém světle a poskytují černobílé vidění. Čípky fungují v dobře osvětlených podmínkách a jsou odpovědné za vnímání barev, stejně jako za vysoce ostré vidění používané například při čtení. Třetí typ buňky snímající světlo, fotosenzitivní gangliová buňka, je důležitá pro řízení cirkadiálního rytmu a zornicového reflexu, má tak doplňkovou úlohu v procesu vidění. [51] [53]

### 3.9.1.8 Sklivec

Sklivec, latinsky corpus vitreum, vyplňuje vnitřek oka mezi čočkou a sítnicí. Tato výplň tvoří většinu oka, lze ho charakterizovat jako průhledné, čiré, bezbarvé, rosolovité těleso s řídkou vláknitou strukturou. Sklivec je tvořen z 98 % vodou a ze 2 % kombinací hyaluronátu sodného a kolagenových vláken. Střední osou sklivce probíhá sklovitý kanál, je zbytkem po embryonální tepénce, která vyživovala čočku. Ta vycházela z papily zrakového nervu, oblasti sítnice oka, kde vzniká zrakový nerv, tzv. slepá skvrna. [50] [51]

### 3.9.2 Nitrooční čočka

Nitrooční čočka, anglicky intraocular lens a zkráceně jen IOL, je čočka implantovaná do oka jako součást léčby šedého zákalu nebo krátkozrakosti. Nejběžnější typ IOL se implantuje během operace šedého zákalu poté, co byla odstraněna přirozená čočka zakaleného oka. IOL poskytuje stejnou funkci zaostření světla jako přirozená krystalická čočka. Samotná nitrooční čočka se obvykle skládá z malé akrylátové čočky s bočními vzpěrami, které drží čočku na místě v kapsulárním vaku uvnitř oka. Nitrooční čočky byly obvykle vyrobeny z nepružného materiálu (akrylátové sklo), to bylo z části nahrazeno použitím flexibilních materiálů, jako je například silikon. [54]

Chirurgové ročně implantují více než 6 milionů nitroočních čoček. Proceduru lze provést v lokální anestézii, přičemž pacient je vzhůru po celou dobu operace. Použití pružné nitrooční čočky se umožňuje, aby čočka rolovala pro vložení do kapsulárního vaku velmi malým řezem, čímž se zabrání potřebě stehů. Tento postup obvykle trvá v rukou zkušeného oftalmologa méně než 30 minut. Doba zotavení je asi dva až tři týdny. Po operaci by se pacienti měli vyvarovat namáhavému cvičení, ostatně čehokoli, co významně zvyšuje krevní tlak, dále by měli pravidelně několik měsíců navštěvovat své oční lékaře, kvůli kontrole implantátů. Implantace IOL s sebou nese několik rizik spojených s operacemi očí, jako je infekce, uvolnění čočky, rotace čočky, zánět nebo nepříznivé efekty halo či glare. Systematický přehled studií ale zjistil, že postup je bezpečnější než konvenční laserové ošetření očí. Ačkoli nitrooční čočky umožňují mnoha pacientům snížit závislost na brýlích, většina pacientů bude stále vázaná na brýle při určitých činnostech, jako je například čtení. Rozhodujícím faktorem je specifikace typu IOL, například monofokální, multifokální nebo EDoF. [54] [55] [56]

### 3.9.2.1 Torická nitrooční čočka

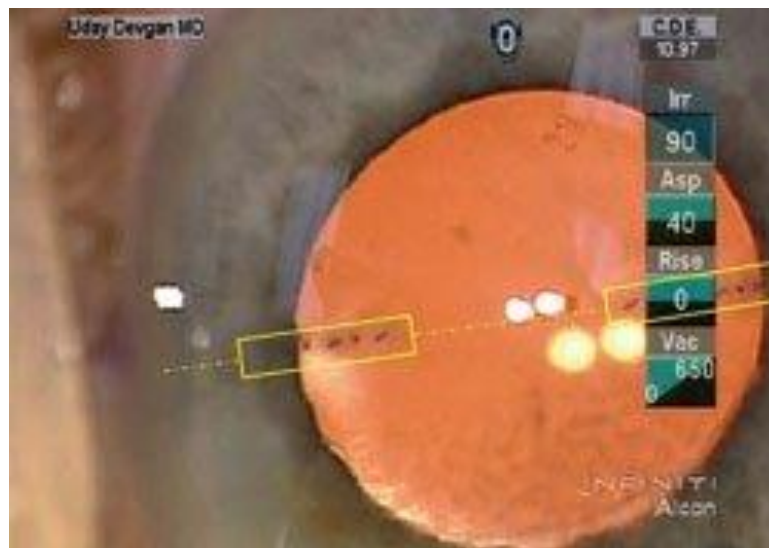
Torická nitrooční čočka, zkráceně jen TIOL, je typ torické čočky používaný ke korekci již existujícího astigmatismu rohovky, v době operace šedého zákalu. Astigmatismus je refrakční vada asférická, při které nemá optický aparát oka ve všech meridiánech stejnou optickou mohutnost. Příčinou může být vada zakřivení, nesprávná centrace či index lomu. Astigmatismus lze také léčit pomocí LRI řezů nebo operací LASIK. Operace šedého zákalu s implantací TIOL je v podstatě stejná jako operace šedého zákalu s konvenční IOL. Stejně jako torické kontaktní čočky mají torické nitrooční čočky různé síly v různých meridiánech čočky, musí tak být umístěny na správném meridiánu, aby se zvrátil již existující astigmatismus. [57] [58]



Obrázek 7: Ukázka torické nitrooční čočky [57]

Standardní TIOL jsou monofokální, což znamená že má jen jednu zaostřovací vzdálenost. Čočka je nastavena tak, aby zaostřovala na blízké, střední nebo velké vzdálenosti. Pro většinu lidí je čočka nastavena na jasné vidění na dálku. Pacienti pak nosí brýle na například na čtení. K dispozici jsou také multifokální TIOL. Tyto čočky poskytují pacientovi nejen korekci již existujícího astigmatismu, rovněž také soustředěné vidění na dálku a stejně tak i na čtecí vzdálenost. Další možností je využití EDoF TIOL, pro ně je symbolické vytvoření jediného protáhlého ohniska. Umožňuje tak ostré vidění na všechny vzdálenosti bez „mrtvých“ zón, které se objevují u multifokálních čoček. Nevýhodou je však snížení saturace vnímaných barev. [59] [60]

Nedílnou součástí samotného modelu torické nitrooční čočky jsou centrační body. Ty slouží oftalmologovi pro správné zaměření osy astigmatismu a vizuální osy. Dokonce i mírná odchylka mimo osu může významně snížit účinnost umístěné TIOL. Například čočka umístěná 30° od osy ztrácí 100 % své optické účinnosti, i mnohem menší odchylky tak mají stále znatelné účinky na efektivitu implantované čočky. Pokud je torická nitrooční čočka, která koriguje 2 D rohovkového astigmatismu, mimo osu jen o 6°, ztratí tak 0,4 D své účinnosti, což odpovídá 20 % ztrátě optické účinnosti. [61]



Obrázek 8: Zarovnání centračních bodů během operace [61]



## 4 Praktická část

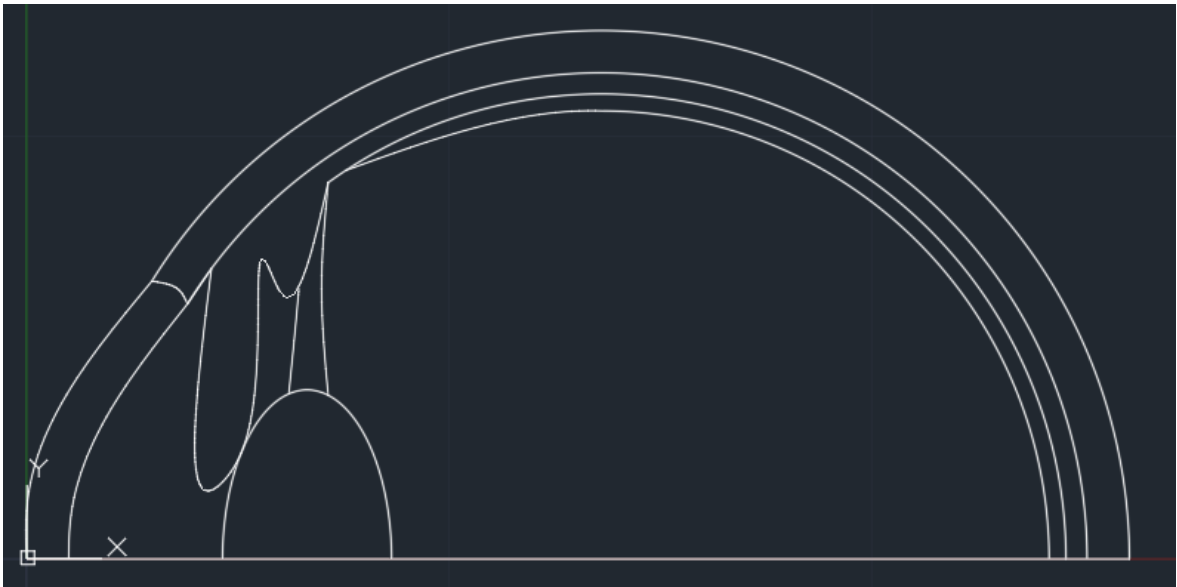
### 4.1 Tvorba modelu oka

Pro tvorbu modelu oka bylo použito 2D i 3D CAD programů. Nejdříve byl vytvořen 2D návrh za pomoci programu AutoCAD, následoval 3D model vytvořený v programu SolidWorks.

#### 4.1.1 AutoCAD

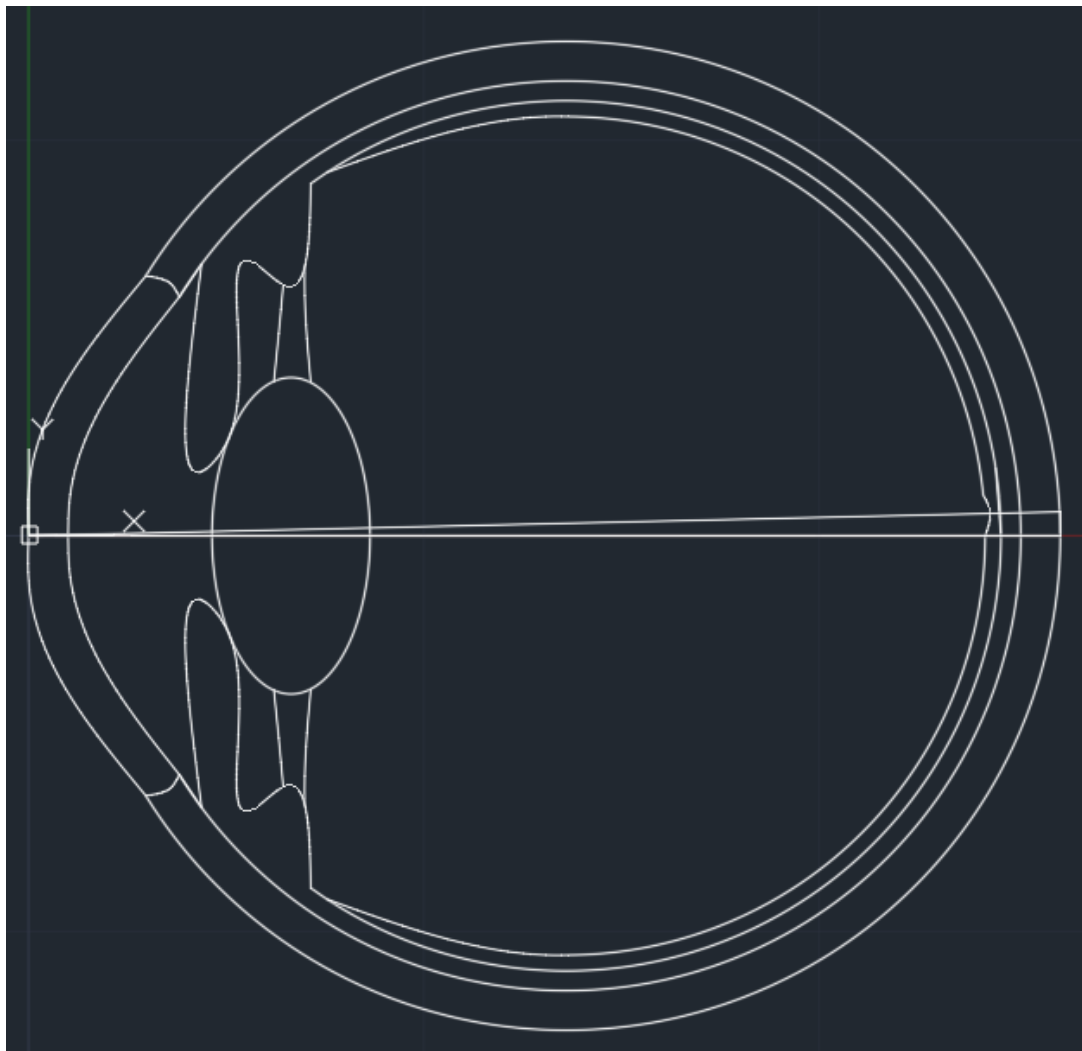
Software AutoCAD 2021 byl získán za pomoci studentské licence, kterou Autodesk nabízí pro většinu svých produktů. Samotný software není nijak omezen v rámci nabízených funkcí, jen je třeba počítat se zákazem případného komerčního využití programu. Návrh vytvořený v programu AutoCAD slouží pro jednoduchou ukázkou 2D řezu oka, která může sloužit pro lepší orientaci při tvorbě 3D modelu v následujících krocích.

V prvním kroku návrhu jsou znázorněny části oka jako bělma, rohovka, cévnatka, řasnaté tělísko, zonula nebo čočka. Návrh je pro zjednodušení tvorby řešen pouze z poloviny, druhá část řezu se vytvoří použitím funkce zrcadlení. Jednotlivé rozměry oka jsou velmi variabilní. Maximální průměr oka je cca 27 mm.



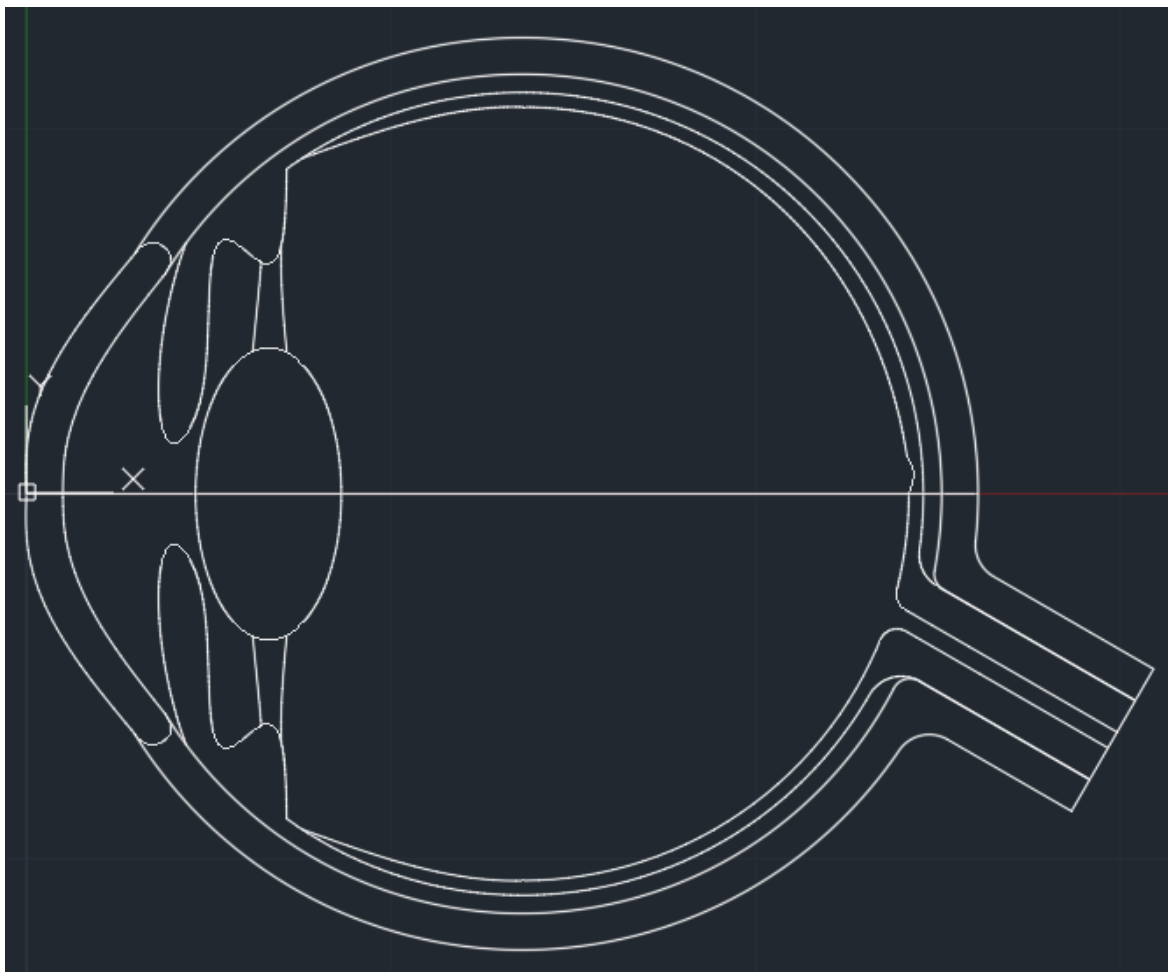
Obrázek 9: AutoCAD, Návrh 1

Po použití funkce *Zrcadlit* je vytvořen již více ucelený, ale stále poměrně zjednodušený řez oka. V ose vidění, která se nachází cca 4° nad optickou (středovou) osou, je vytvořena žlutá skvrna. Dále bylo upraveno zobrazení suspenzních vazů čočky.



Obrázek 10: AutoCAD, Návrh 2

Ve finálním návrhu celého řezu oka došlo k menším úpravám řasnatého tělíska a tvaru rohovky. Rovněž byl také vytvořen kompletní návrh zrakového nervu. Všechny části návrhu byli tvořeny za pomoci funkcí *Úsečka*, *Spline*, *Elipsa* nebo *Oblouk*. Rovněž pro úpravu náčrtu bylo využito funkcí jako *Oříznout* nebo *Zaoblit*.



Obrázek 11: AutoCAD, Návrh 3

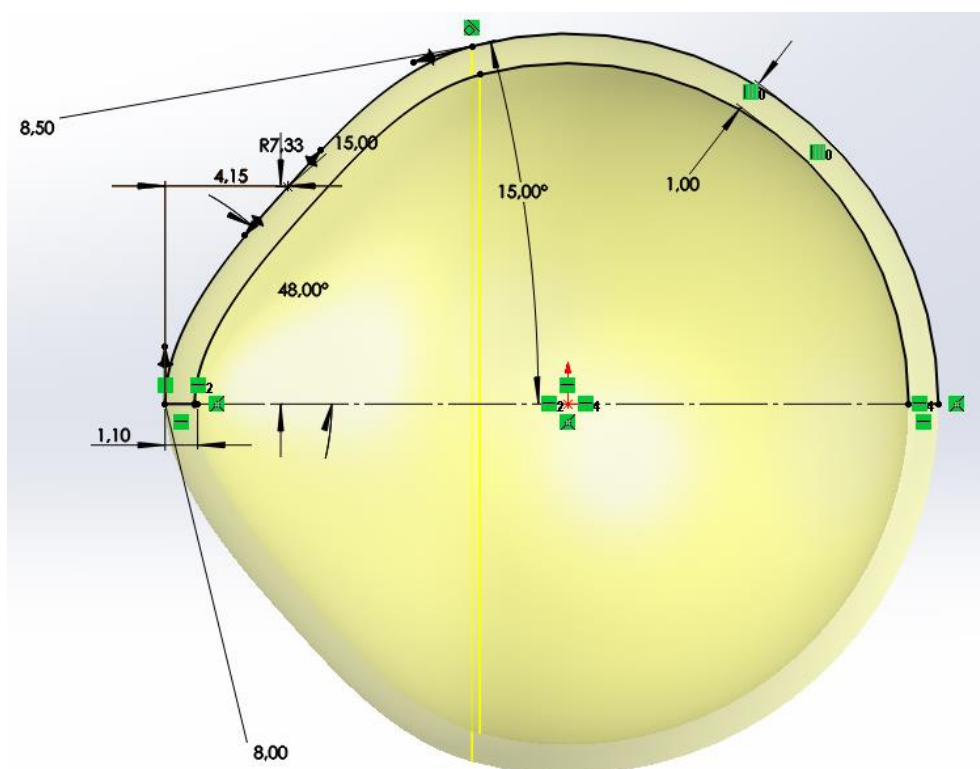
#### 4.1.2 SolidWorks

Pro tvorbu 3D modelu lidského oka bylo využito softwaru SolidWorks, konkrétně verze SolidWorks 2020 Professional. Pro získání licence bylo využito zkušební lhůty, která umožňuje přístup ke všem nabízeným funkcím programu pro 3D modelování po dobu 14 dní. Licence je nabízena k nově vytvořenému účtu pro platformu SolidWorks.

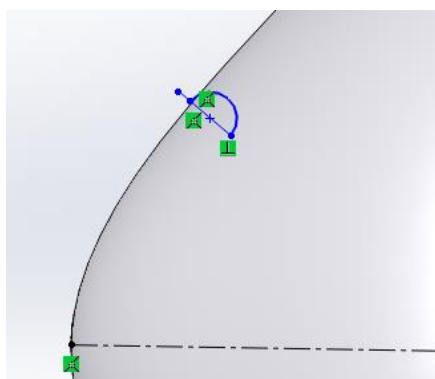
Model oka je tvořen ze sedmi hlavních objemových těles, patří mezi ně rohovka, řasnaté tělísko, čočka, bělmo, cévnatka, zonula a sítnice. K daným tělesům jsou v některých případech přiděleny i vlastní textury pro lepší vizuální efekt výsledného modelu. Samotný

model je rozdělen do dvou konfigurací, v první se pracuje s modelem v řezu, ve druhé je model již kompletní.

Nejprve byl vytvořen jednoduchý základ tělesa, ze kterého se postupně vytvářela bělma a rohovka. Původní náčrt byl tvořen za pomoci funkcí *Spline*, *Oblouk* a *Přímka*. Pro vazby objektu byly vloženy další kóty upřesňující jednotlivé polohy například bodů, ze kterých se vycházelo při náčrtu u funkce *Spline*. Následně se na uzavřené náčrty použila funkce *Přidání rotací*, která rotací podle základní osy vytvořila první 3D těleso. Rohovka byla po vytvoření základního tělesa oddělena pomocí funkce *Odebrání tažením po křivce*, podle oblouku, který ji odděloval. Vznikají tak první dvě objemová tělesa, bělmo a rohovka.

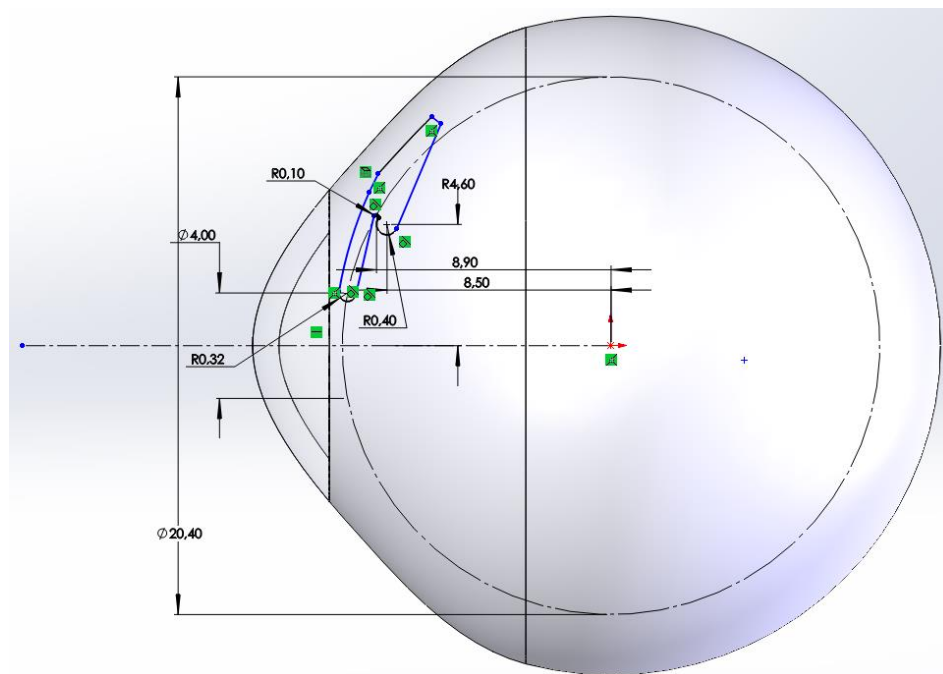


Obrázek 12: SolidWorks, Základ tělesa



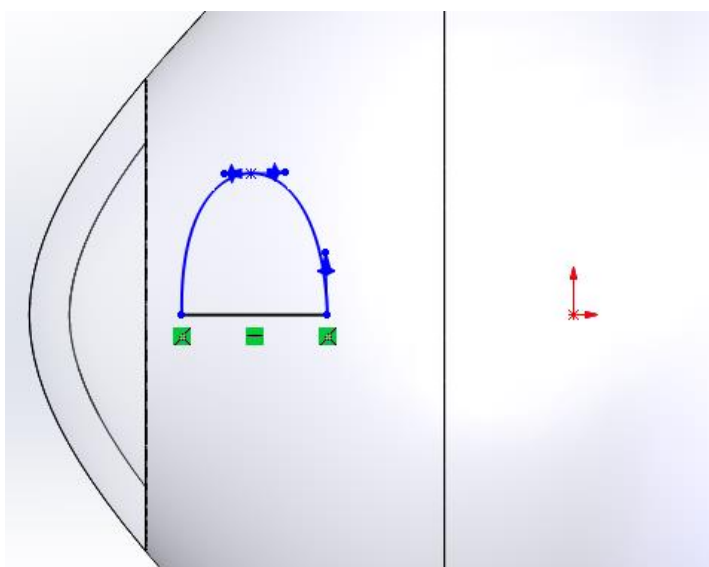
Obrázek 13: SolidWorks, Detail oddělení rohovky

Následuje separátní tvorba objemového tělesa řasnatého tělíska. Oproti návrhu z AutoCADu je zde znatelné zjednodušení, využito bylo především funkcí *Spline*, na které navazuje *Oblouk*. Uzavřený náčrt se do 3D opět převede přes funkci *Přidání rotací*.



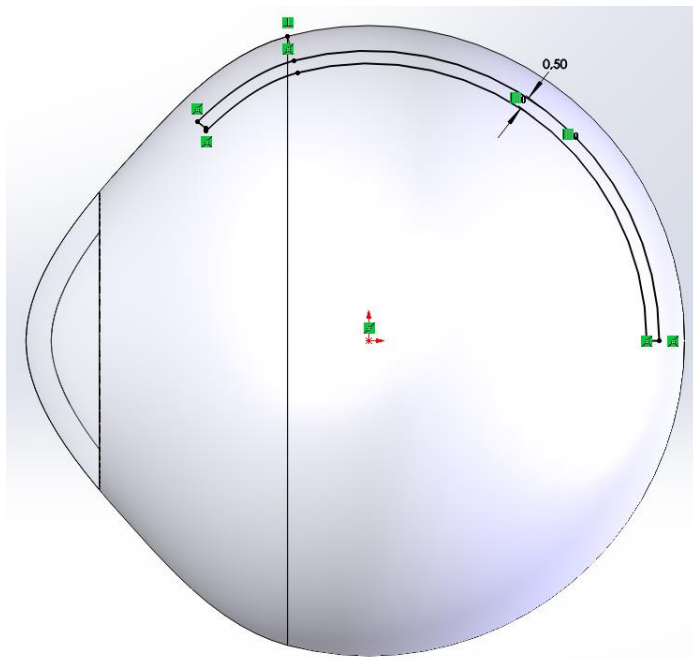
Obrázek 14: SolidWorks, Řasnaté tělísko

Tvorba objemového tělesa čočky je jednoduchý úkol, ovšem z technického hlediska poměrně ošemetný. Samotná čočka disponuje nepravidelnými tvary, i když se tedy může jevit jako elipsa, není tomu tak. Je tvořena dvěma separátními spliny, které mají na každé straně trochu jiné zakončení. Do 3D se převádí opět rotací podle hlavní osy.



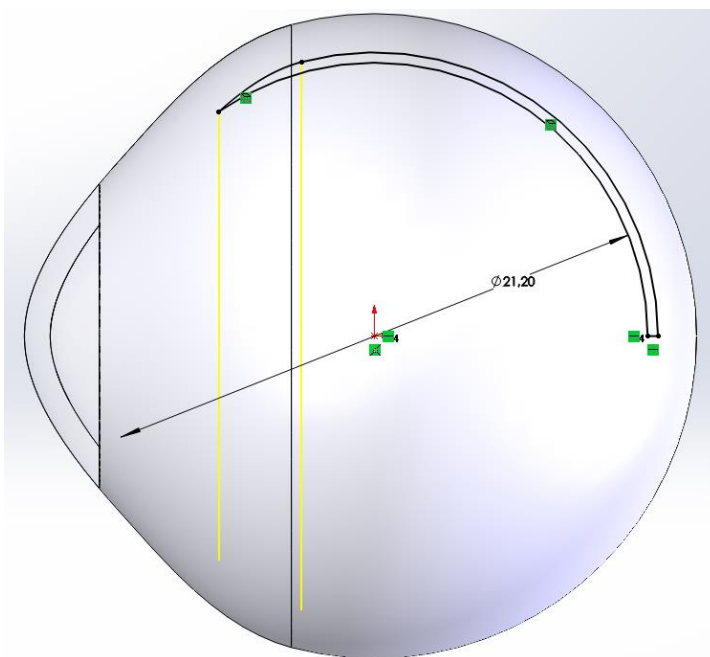
Obrázek 15: SolidWorks, Tvorba čočky

Cévnatka navazuje na řasnaté tělísko, její tvar je vytvořen za pomoci funkcí *Oblouk* a uzavření náčrtu je pomocí funkce *Přímka*. Objemové těleso je rovněž vytvořeno rotací podle hlavní osy.



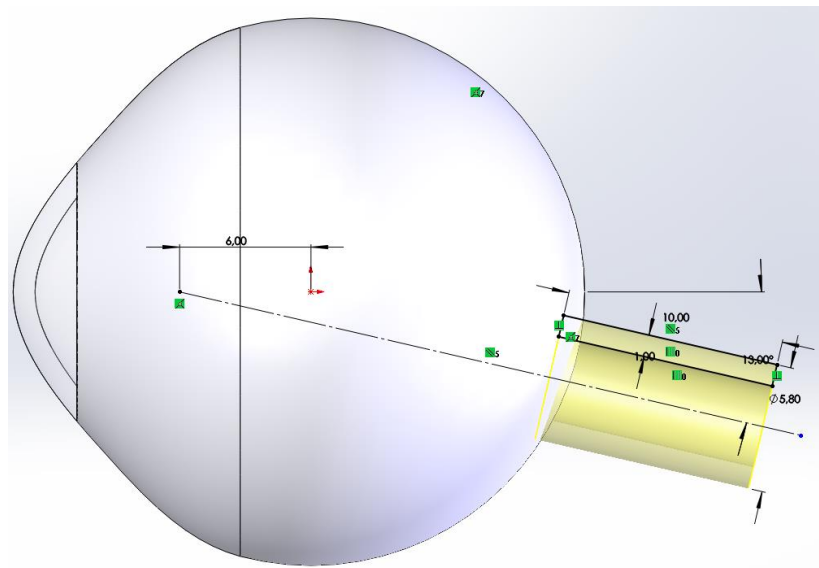
Obrázek 16: SolidWorks, Cévnatka

Uzavřený náčrt sítnice je tvořen pomocí funkcí *Oblouk*, s tím že pro jednu stranu bylo pomocí funkce *Spline* svedeno zakončení do jednoho bodu. Výsledné objemové těleso pro sítnici vzniká opět rotací podle hlavní osy.



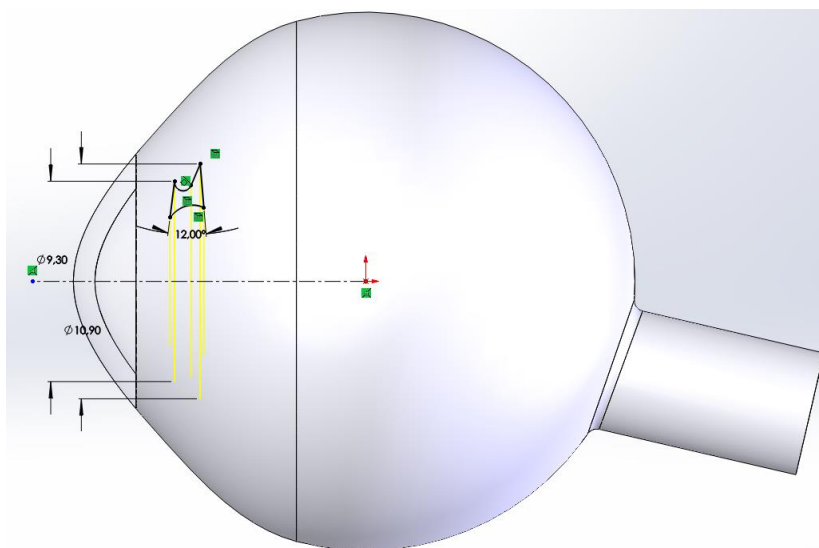
Obrázek 17: SolidWorks, Sítnice

Pro tvorbu zřetivého nervu byla vytvořena vlastní osa, podle které se následně rotací vytvořilo objemové těleso, které ovšem díky svému umístění spadá bylo propojeno s objemovým tělesem bělimy. Následně byli vytvořeny dva další různé průměry, podle kterých se jednotlivé části zřetivého nervu propojily s cévnatkou a sítnicí. Posléze se vnější spojení s bělimou zaoblilo pro lepší vizuální efekt.

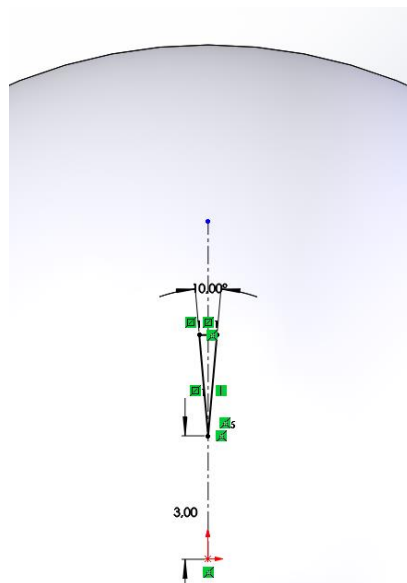


Obrázek 18: SolidWorks, Zřetivý nerv

Jedním z posledních kroků při tvorbě modelu oka bylo vytvoření suspenzních vazů čočky. Ty jsou zavěšeny na řasnatém tělisku a drží čočku. Pro jejich tvorbu byl vytvořen návrh splinů spojující tyto dva objekty, ten se následně do 3D převedl rotací. Z ní byli ovšem, za pomoci funkce *Kruhové pole*, odděleny po celém obvodu malé části tělesa. Docílilo se tak lépe vypadajícího konečného modelu.



Obrázek 19: SolidWorks, Zonula



Obrázek 20: SolidWorks, Zonula – detail

V dalším kroku se pro zvolená objemová tělesa nastavily textury povrchu. Konkrétně se změny projevily na tělesech sítnice, zonuly a pro duhovku, tedy část řasnatého tělíska. Pro ostatní objemová tělesa byly vhodné jednoduché barvy.



Obrázek 21: Textura sítnice

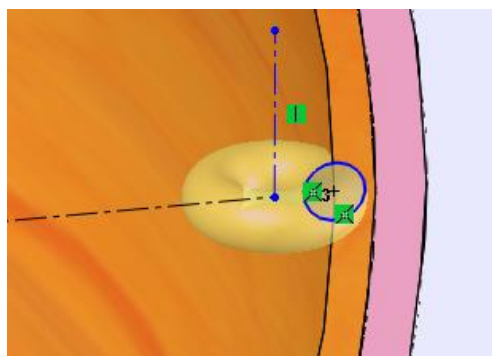


Obrázek 22: Textura zonuly



Obrázek 23: Textura duhovky

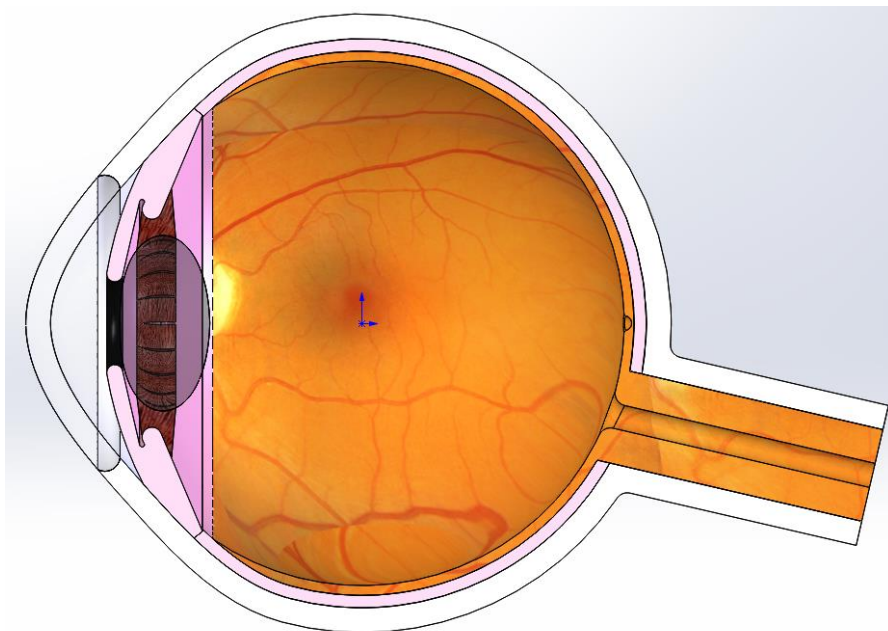
Posledním signifikantním krokem byla tvorba žluté skvrny, ta se vytvořila pomocí funkce *Odebrání rotací* na zvoleném náčrtu elipsy, která odebrala materiál podle nově vytvořené osy.



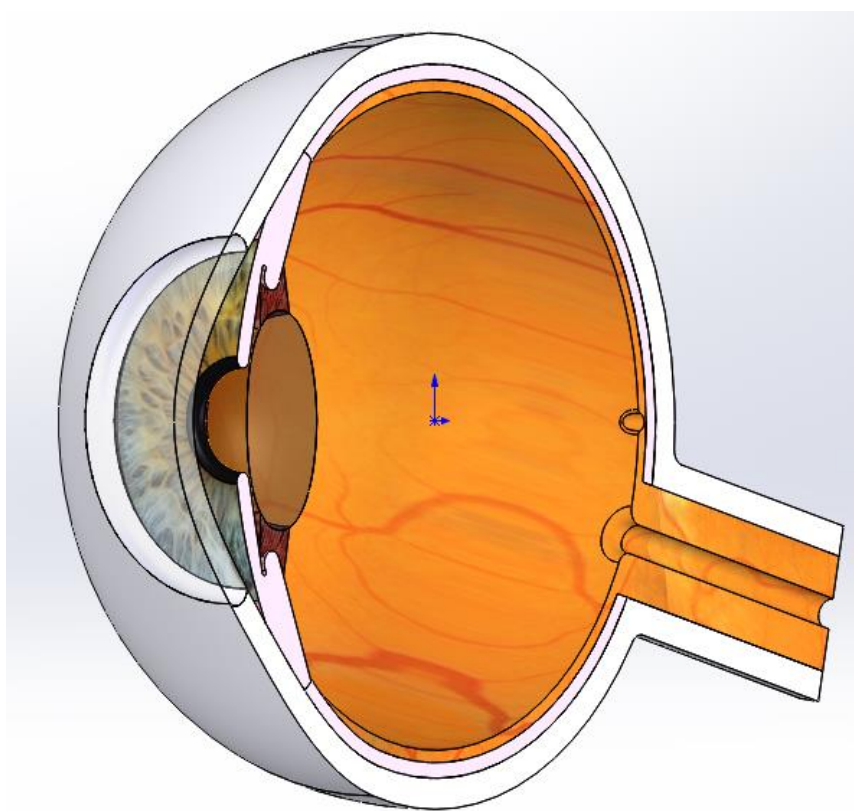
Obrázek 24: SolidWorks, Žlutá skvrna



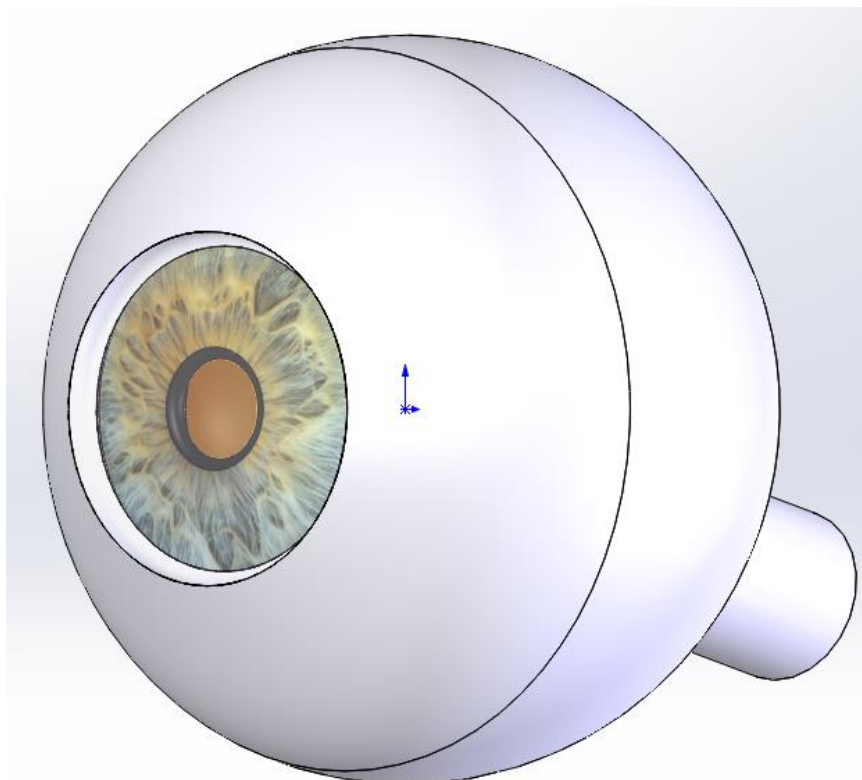
Finální úpravy jen zlepšovaly celkový vzhled modelu, jednalo se například o použití funkce *Zaoblení* u přechodu zrakového nervu do sítnice, nebo u právě zmiňované žluté skvrny.



Obrázek 25: SolidWorks, Řez oka 1/2



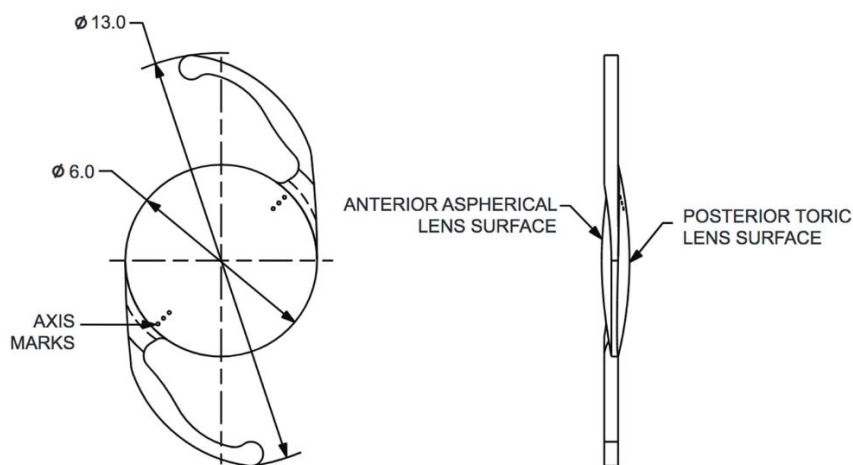
Obrázek 26: SolidWorks, Řez oka 2/2



Obrázek 27: SolidWorks, Finální model oka

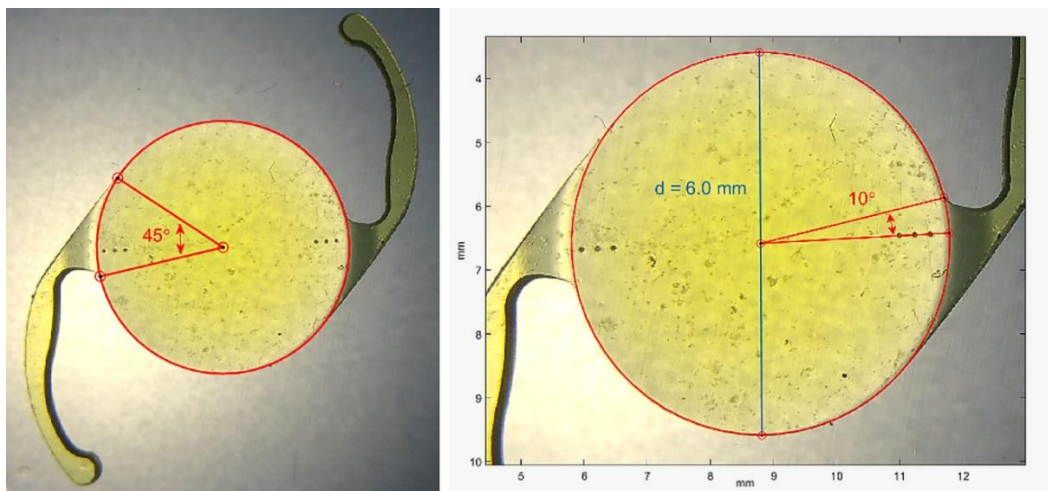
## 4.2 Model torické nitrooční čočky

Model torické nitrooční čočky byl vytvořen v 3D CAD programu SpaceClaim, který byl získán v součásti balíčku programů Ansys Student pod studentskou licenci. Jedná se o zjednodušený obecný model torické nitrooční čočky od společnosti AcrySof, konkrétně model MN60AC. Tento model má různé další konfigurace, jejichž optická mohutnost se pohybuje od +6.0 D až po +30.0 D.



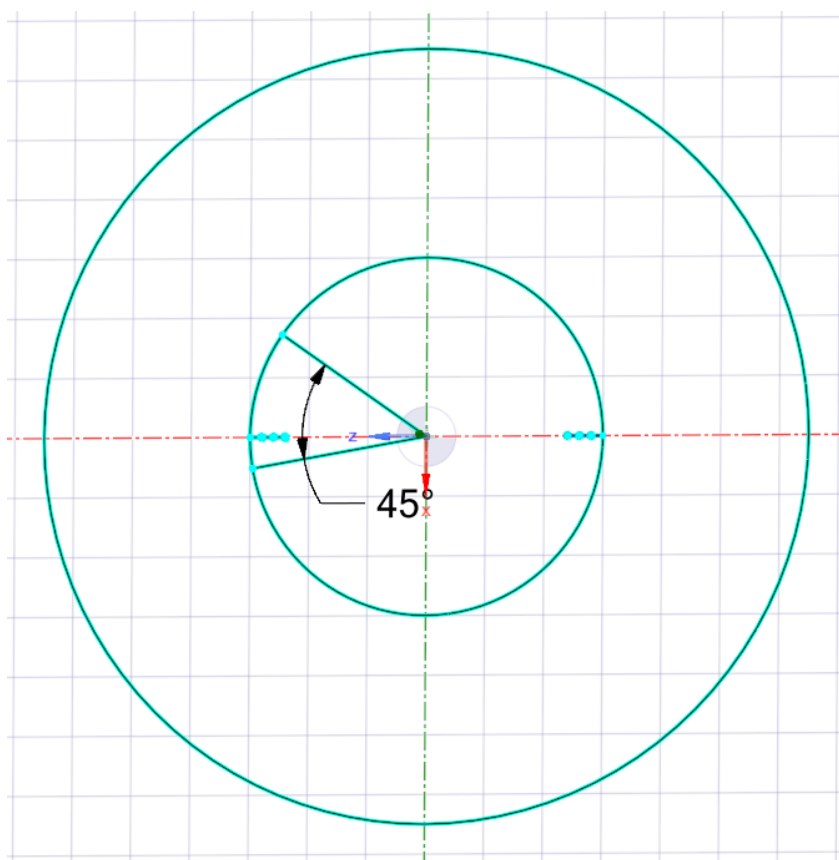
Obrázek 28: AcrySof MN60AC [62]

Boční vzpěry, neboli haptiky, vyčnívající z optiky čočky, jsou stejně jako čočka samotná vytvořeny z PPMA, jejich rozpětí vůči centračním bodům je vidět na obrázku níže.



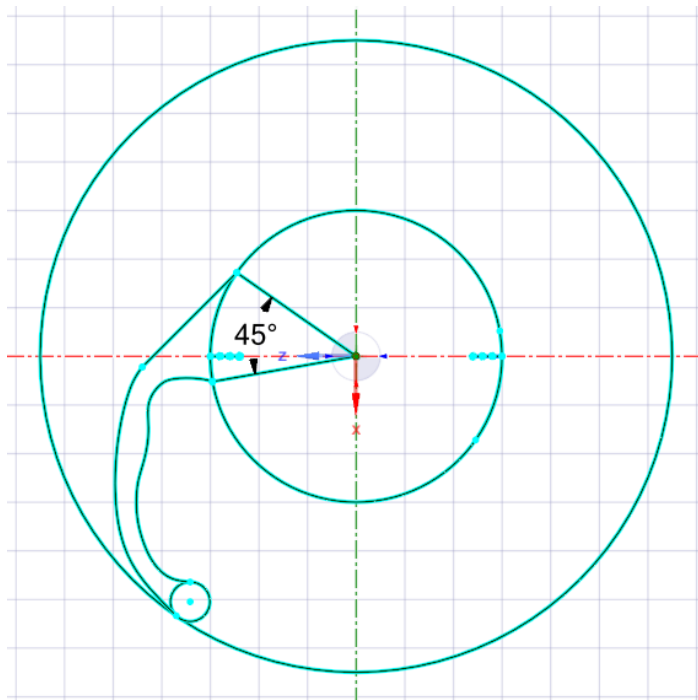
Obrázek 29: Rozpětí haptiky vůči centračním bodům

První krok u tvorby modelu nitrooční čočky bylo vytvoření kruhů, za pomoci funkce *Circle*, o průměrech 6 a 13 mm. Následovala tvorba centračních bodů o průměru 0,1 mm a byli vytvořeny i pomocné body pro tvorbu haptiky, svírající vůči centračním bodům úhel  $10^\circ$ , respektive  $35^\circ$ , celkem tedy  $45^\circ$ .



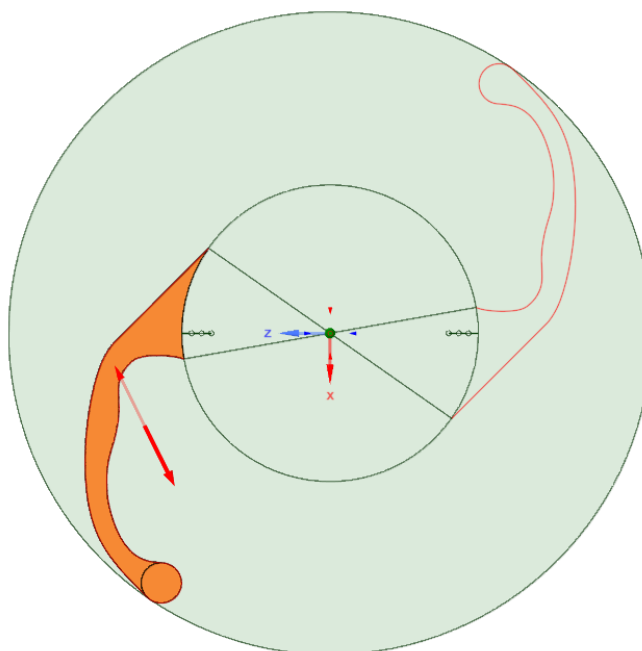
Obrázek 30: SpaceClaim, První kroky

V dalším kroku byla vytvořena haptika, její konec je tvořen kruhem pomocí funkce *Circle* a spojení s čoučkou je tvořeno spliny (funkce *Spline*).



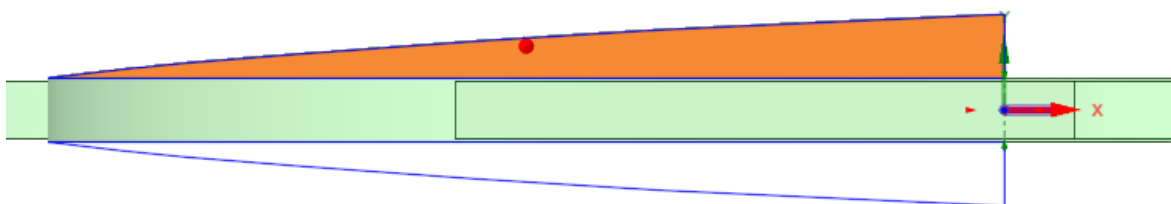
Obrázek 31: *SpaceClaim*, Tvorba haptiky

Z uzavřeného náčrtu s pomocí kruhového pole (funkce *Circular pattern*) byla vytvořena po zvolení osy rotace (osa Y), úhlu ( $180^\circ$ ) a počtu výsledných těles (2) druhá haptika.



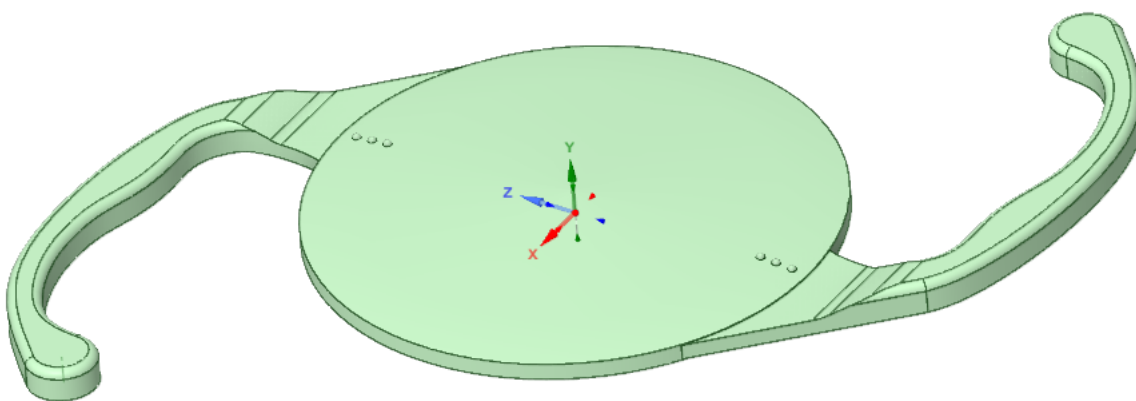
Obrázek 32: *SpaceClaim*, Kruhové pole

Po vysunutí celého tělesa (funkce *Pull*) o zhruba 2 mm bylo nutné vytvořit zaoblený povrch čočky. Tím bylo docíleno funkcí *Spline*, a nastavením zrcadlení podle osy X. Tím byli vytvořeny dva totožné náčrty, které se pomocí rotace (funkce *Revolve*) doplnily celistvost čočky. Jedná se pouze o zjednodušený model, samotný povrch čočky je nejdůležitější částí celé TIOL, v závislosti na modelu a specifikaci (monofokální, multifokální, EDoF, atd.) se povrch velmi liší. Pro naše potřeby nebylo nutné povrch čočky dále specifikovat či upravovat.



Obrázek 33: SpaceClaim, Tvorba čočky

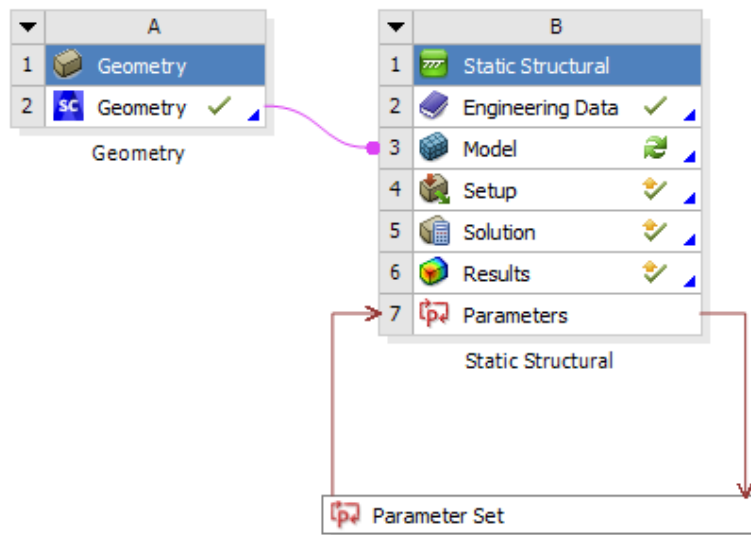
Posledním krokem bylo vysunutí haptik, které byli následně zaobleny (funkce *Round*) a následně při přechodu do čočky opět zkoseny (funkce *Chamfer*). Na obrázku 34 je zobrazen již konečný model torické nitrooční čočky.



Obrázek 34: SpaceClaim, Finální model

### 4.3 Testování FEM

Pro testování vlastností torické nitrooční čočky bylo využito dalších z řady programů společnosti Ansys, které byly rovněž získány s licencí Ansys Student, konkrétně se jedná o software Workbench a Mechanical.



Obrázek 35: Workbench, Základní struktura

Prvním krokem byl import geometrie modelu torické nitrooční čočky, to se provedlo použitím základní funkce *Geometry* v oblasti systémových komponent. Další součástí je *Static Structural*, která je součástí souboru systémů pro analýzu. Důležitým parametrem pro tvorbu jakékoliv FEM analýzy je materiál. Pro zvolený model nitrooční čočky je materiál udáván jako PMMA, známý jako akrylátové sklo. Každý dodavatel má ovšem pro své vlastní modely trochu jiné parametry. Pro naši analýzu byl vytvořeno vlastní přiřazení materiálu, splňující dohledatelné obecné parametry pro PMMA. Například hustota materiálu je rovna  $1,18 \text{ g/cm}^3$ , Youngův modul je roven hodnotě  $2855 \text{ MPa}$  a Poissonovo číslo je rovno  $0,4$ .

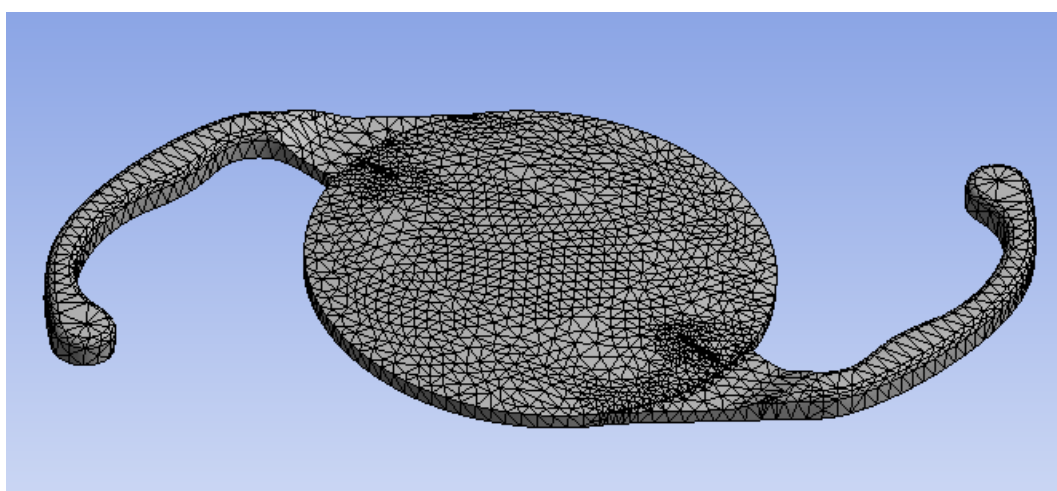
Details of "Geom\TIOL"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Treatment	None
- Material	
<input type="checkbox"/> Assignment	PMMA
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes

Obrázek 36: Mechanical, Označení materiálu pro model TIOL

V dalším kroku byla vytvořena síť (*Mesh*), o vhodné hustotě prvků. Cílem je vytvořit síť, která přesně zachytí geometrii vstupního tělesa. Síť by měla být dostatečně hustá pro přesné výsledky, nikoliv však příliš, aby byly následné výpočty stále řešitelné. Pro náš případ byla zvolena hustota prvků (*Element Size*) 0,0002 m.

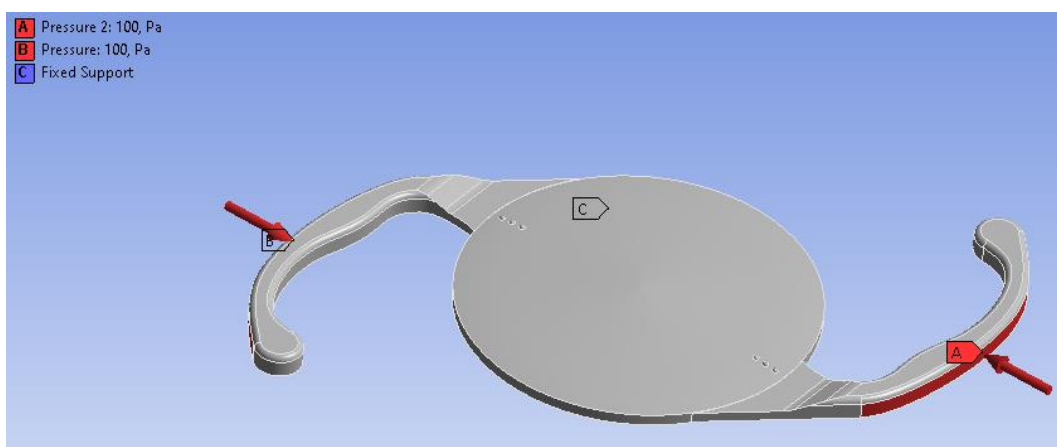
Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> <b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<input type="checkbox"/> <b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	2,e-004 m

Obrázek 37: Mechanical, Nastavení sítě



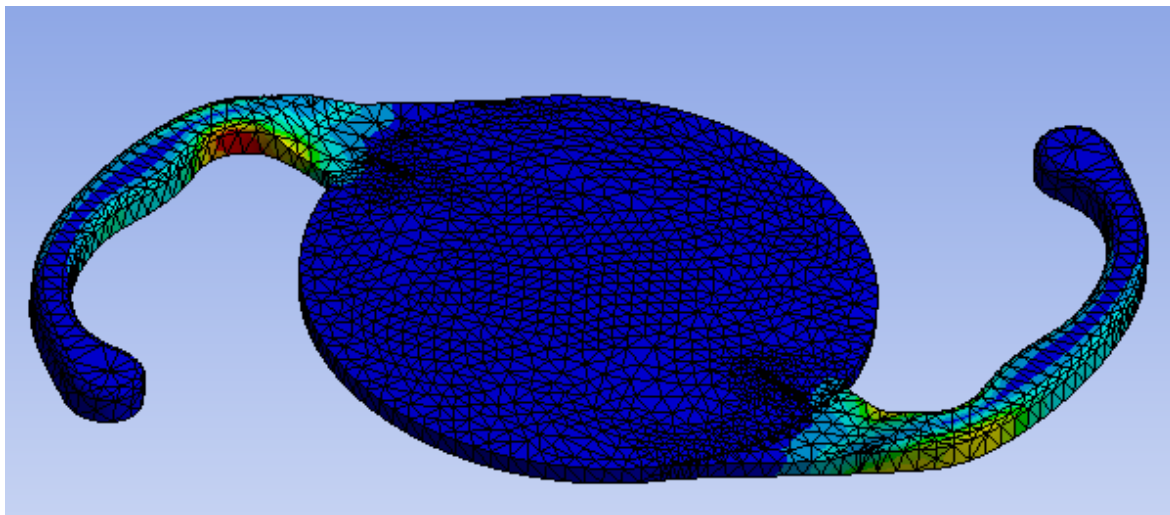
Obrázek 38: Mechanical, Meshed model

Následovala strukturní analýza. Byly zvoleny dvě plochy na haptikách čočky, kde působí tlak. Hodnota tlaku je nastavena jako parametr. Rovněž byla zvolena pevná podpora ve spodní části čočky, která ji zamezuje v pohybu a deformaci.

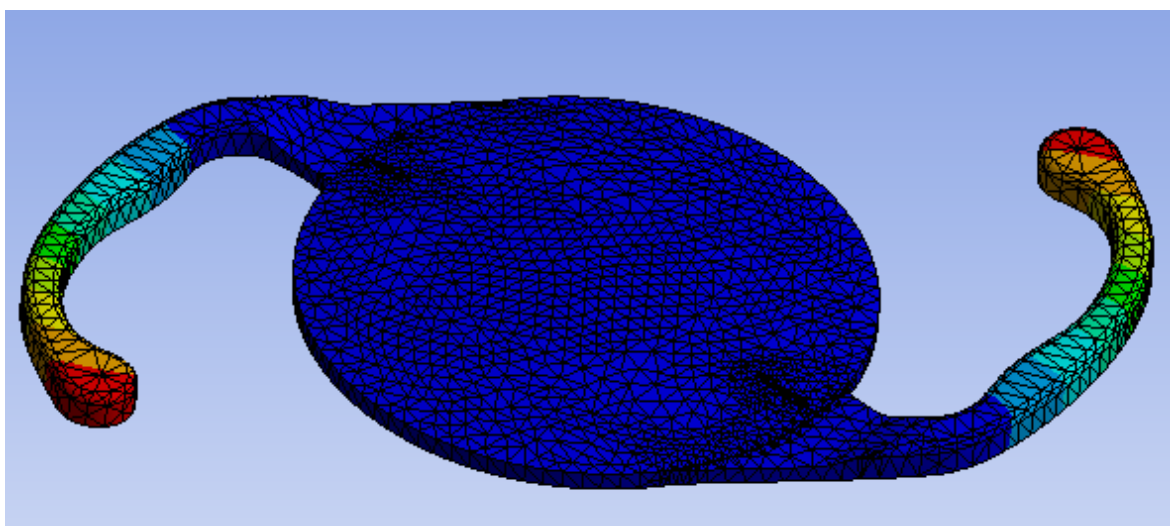


Obrázek 39: Mechanical, Strukturní analýza

Poslední částí je oblast řešení analýz. Řešení problému bylo zaměřeno na analýzu napětí von-Mises a analýzu celkové deformace. Průměrné hodnoty těchto analýz byly rovněž uloženy jako parametr.



Obrázek 40: Mechanical, Napětí von-Mises



Obrázek 41: Mechanical, Celková deformace

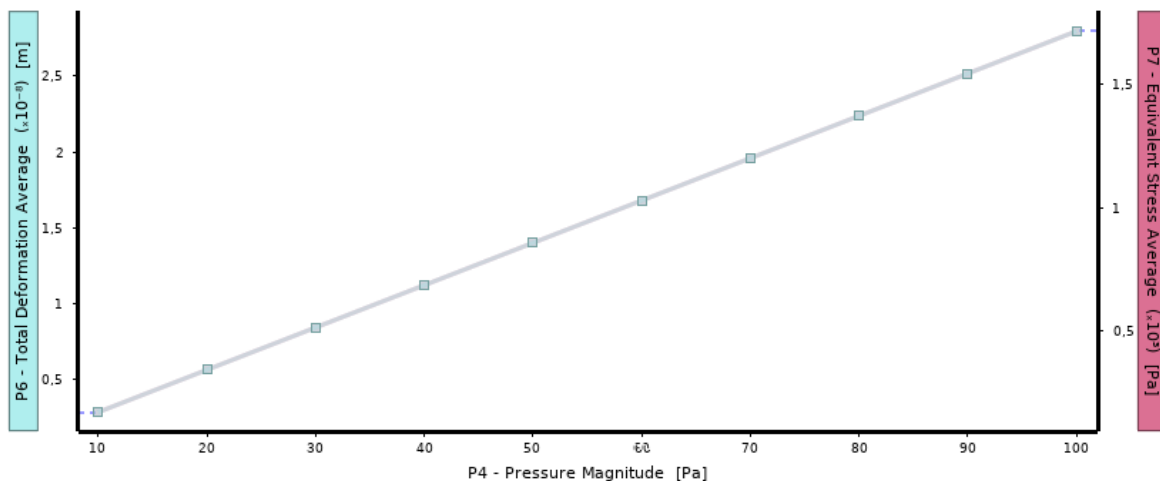


Pro analýzu byly zvoleny hodnoty tlaku od 10 Pa, až po 100 Pa, působící na obě haptiky. Z tabulky jsou zřejmé i průměrné hodnoty pro celkovou deformaci [m] a průměrné hodnoty pro napětí von-Mises [Pa]

Table of Design Points					
	A	B	C	D	E
1	Name	P3 - Pressure 2 Magnitude	P4 - Pressure Magnitude	P6 - Total Deformation Average	P7 - Equivalent Stress Average
2	Units	Pa	Pa	m	Pa
3	DP 0 (Current)	10	10	2,7975E-09	171,43
4	DP 1	20	20	5,5949E-09	342,86
5	DP 2	30	30	8,3924E-09	514,3
6	DP 3	40	40	1,119E-08	685,73
7	DP 4	50	50	1,3987E-08	857,16
8	DP 5	60	60	1,6785E-08	1028,6
9	DP 6	70	70	1,9582E-08	1200
10	DP 7	80	80	2,238E-08	1371,5
11	DP 8	90	90	2,5177E-08	1542,9
12	DP 9	100	100	2,7975E-08	1714,3
*					

Obrázek 42: Workbench, Tabulka hodnot

Z naměřených hodnot byl posléze vytvořen v aplikaci Workbench rovněž i graf, který znázorňuje poměry mezi celkovou deformací a napětím von-Mises proti původnímu tlaku. Stupnice celková deformace [ $m \times 10^8$ ] je na levé ose grafu, napětí von-Mises [ $Pa \times 10^5$ ] na pravé ose grafu a působící tlak [Pa] na vodorovné ose.



Obrázek 43: Workbench, Vytvořený graf

Dle tabulkových hodnot zobrazených v grafu je zřejmé, že tendence hodnot je lineární, nikoliv exponenciální. Se zvyšující se hodnotou tlaku se rovnoměrně zvyšuje i napětí a deformace tělesa.

## 4.4 Zhodnocení a kalkulace

Pro volbu vhodného programu je třeba zvážit využití v oboru. Například AutoCAD se svým zaměřením především na 2D navrhování nabízí možnosti pro tvorbu kvalitní výkresové dokumentace. Umožňuje i případné možnosti velmi jednoduchého 3D modelování, což může být využito například pro lepší vizualizaci návrhů, oproti CAD programům jako například SolidWorks ovšem nedisponuje možnostmi simulací. Vhodné využití pro AutoCAD je v menších firmách, které nevyužijí právě zmiňované simulace a nepracují s velkými sestavami dílů.

Oproti tomu zmiňovaný SolidWorks lze považovat za určitou nadstavbu vůči AutoCADu. Svými funkcemi AutoCAD mnohokrát převyšuje a například pro oblast strojírenství nabízí velmi široké knihovny dílů, které lze posléze i testovat pomocí integrovaných FEM simulací. SolidWorks nabízí i větší možnosti při tvorbě samotných mechanických součástí, díky specializovaným funkcím například pro plechy.

SpaceClaim je v tomto porovnání trochu unikátní. Možnostmi do určité míry může konkurovat i programu SolidWorks, nabízí robustní možnosti CAD modelace a obdobně obsahuje také funkce pro zjednodušení tvorby strojírenských součástí. Svým zaměřením je ale vhodný především pro využití FEM simulací u ostatních programů z portfolia společnosti Ansys, které jsou na modely vytvořené v programu SpaceClaim často vázané.

Ceny jednotlivých CAD programů a potažmo i simulačních FEM programů, které byli použity při tvorbě praktické části diplomové práce jsou velmi rozdílné. Nejlevnější variantou jsou řešení AutoCAD LT, s cenou pod 15 000 Kč za roční licenci. Jedná se o vhodné řešení pro uživatele nebo malé firmy, které hledají software pro realizaci kvalitní výkresové dokumentace. Výhodou je také flexibilita v rámci formátů souborů, především co se týče velmi používaného a známého formátu DWG, který je nativním formátem programu AutoCAD. Absence 3D modelace u této verze je odražena na ceně, jelikož licence pro klasickou verzi softwaru AutoCAD stojí bezmála 63 000 Kč. Oproti tomu lze za zhruba poloviční cenu získat paket Ansys SpaceClaim Essentials, který má mnohem větší možnosti v oblasti 3D CAD, a za zhruba 80 000 Kč lze získat i rozšířenou verzi SpaceClaim Standard, která obsahuje i základní možnosti simulací. Pro oblast 3D CAD je z testovaných softwarů nejrobustnější řešení program SolidWorks. Časté využití nachází například u odborných středních firem. Navíc nabízí výhodnou nabídku zakoupení doživotních licencí, které jsou

však limitovány produktovou verzí. Minimálně po pár letech se tak počítá s pravidelnou obnovou za nové. Cenově vychází verze SolidWorks Professional na zhruba 100 000 Kč.

Samotnou kapitolou je analýza FEM. Již zmiňované programy jako SolidWorks nebo i samotný SpaceClaim do určité míry analýzu FEM nabízejí, pro maximalizaci potenciálu různých analýz a simulací je vhodným řešením Ansys Mechanical Enterprise. Toto řešení je však unikátní nejen množstvím podprogramů, které zajišťují komplexní analýzy modelů, simulace proudění tekutin, teplotních změn, testování dynamiky atd., ale také svojí cenou. Základní licence s cenou zhruba 1 300 000 Kč není pro malé a často ani střední firmy přijatelná, navíc s nutností ročního poplatku zhruba 250 000 Kč.

*Veškeré zde zmíněné ceny jsou již se započítaným DPH.*

#### **4.4.1 Využití v akademické sféře**

Z hlediska využití v akademické sféře mají všechny porovnávané programy co nabídnout. Počínaje programem AutoCAD, ten se svým jednoduchým přístupem vhodným programem pro začátky studentů s technologiemi CAD. Tomu nasvědčuje i fakt, že firma Autodesk, stojící za vývojem programu AutoCAD, je velmi aktivní v propagaci svých výrobků pro školy a vzdělávací instituce. Samotný program nabízí možnosti pro osvojení základních příkazů a funkcí použitelných při tvorbě 2D náčrtů a posléze i 3D modelů. Stejně tak dokáže i prohloubit a ověřit znalosti z teorie technické dokumentace při tvorbě výkresů.

Dalším testovaným programem se dostáváme do oblasti vyšší úrovně CAD programů. Řeč je o softwaru SolidWorks. Jedná se o velmi robustní software, kombinující možnosti 3D modelování a určité funkce simulací. Jedná se o vhodnou volbu pro studenty, kteří mají již určité zkušenosti a povědomí o CAD programech. Pro začátečníky může být ovládnání poněkud složité a pochopení základních funkcí tak může trvat více času. Svým zaměřením na strojírenství je ale vhodným kandidátem pro využití na technických školách. Nevýhodou je ale nepříliš vhodné licencování pro studenty ze strany vývojářů.

SpaceClaim z tohoto porovnání lehce vyčnívá, jeho zaměření není ani tak jako samostatný 3D CAD modelář, ale spíše jako nástroj pro tvorbu modelů, které se posléze testují v navazujících programech podporující například FEM nebo CFD simulace a analýzy. Tomu dopomáhá i fakt, že SpaceClaim má velmi rozsáhlý seznam podporovaných formátů 3D modelů, se kterými může dále pracovat.

Řešení SpaceClaim lze zahrnout pod balík Ansys Student, jehož je spolu s několika simulačními programy součástí. Obrovskou výhodou tohoto balíku je jeho nabídka studentských licencí pro studenty a školy zdarma, obzvlášť s přihlédnutím na cenu originální licence. Je třeba však počítat s omezením výpočtů na 16 procesorových jader a určitou limitací týkající se přesnosti vytvořené sítě a s tím spjaté omezení celkových uzlů. Obecně lze ale považovat řešení Ansys Student jako velmi dobrou volbu pro studenty, kteří mají již předchozí zkušenosti s CAD programy. Pro ně toto řešení nabízí rozšíření znalostí v oblasti simulací FEM a CFD ve velmi specializovaných programech, které jsou využívány v renomovaných společnostech.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnat možnosti použití zvolených CAD programů, konkrétně AutoCAD, SolidWorks a SpaceClaim, z hlediska jejich využití ve firemní a akademické sféře, včetně porovnání finanční stránky. Pro porovnání bylo využito informací získaných ze studia odborných zdrojů v teoretické části diplomové práce, stejně jako praktických znalostí získaných při tvorbě vlastní praktické části.

Teoretická část diplomové práce zahrnuje obecné informace o technologii CAD, včetně historie této technologie a popisu programů zvolených pro porovnání. Rovněž obsahuje informace o technologii FEM, která se stejně jako technologie CAD vyobrazuje na příkladech v praktické části. Posledním aspektem, který je v teoretické části zmíněn, je medicínský obor oftalmologie, z důvodu zaměření praktických úloh, konkrétně model oka a model torické nitrooční čočky, které byly vypracovány v praktické části.

Praktická část diplomové práce popisuje tvorbu zmíněných modelů z oblasti oftalmologie, včetně následné analýzy FEM na modelu torické nitrooční čočky. Součástí praktické části je i vyhodnocení možností použití zvolených programů, při kterých se vycházelo z informací získaných při tvorbě teoretické i praktické části.

Z hlediska porovnání CAD programů ve firemní sféře, byl pro své univerzální využití zvolen nejvhodnějším programem SolidWorks. Ten nabízí oproti programu AutoCAD mnohem více možností modelace ve 3D a oproti programu SpaceClaim nabízí více specifických funkcí a obsáhlé knihovny dílů, obdobně jako SpaceClaim ale nabízí i určité možnosti simulací nebo FEM analýz. Výhodou je i jeho atraktivní cena za doživotní licenci. Ideálním řešením pro akademickou sféru se ale jeví právě SpaceClaim, konkrétně balík Ansys Student, který nabízí pro studenty nejen kvalitní 3D CAD software v podobě SpaceClaim, ale také množství profesionálních simulačních a analytických programů, ke kterým se ve firemní sféře lze dostat jen u velmi specializovaných firem.

## 6 Reference

1. **Bozdoc, Marian.** Introduction to CAD. *i-MB Resources and Information*. [Online] Marian Bozdoc, 2003. [Citace: 15. Únor 2021.] <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-Intro.htm#>.
2. **Hatfield, Scott.** How to Utilize 3D Modeling and Rendering to Prototype Your Design. *Maker Pro | Electronic Projects and Tutorials*. [Online] EETech Media, LLC., 17. Březen 2020. [Citace: 15. Únor 2021.] <https://maker.pro/custom/tutorial/how-to-utilize-3d-modeling-and-rendering-to-prototype-your-design>.
3. **Deans, Marti.** What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)? *Autodesk*. [Online] Autodesk Inc., 17. Březen 2021. [Citace: 2. Duben 2021.] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>.
4. **CADAZZ.** CAD software history, 1960s. *CADAZZ*. [Online] CADAZZ, 2004. [Citace: 9. Březen 2020.] <https://www.cadazz.com/cad-software-history.htm>.
5. **Sevocomm, GmbH.** The History of CAD/CAM since 1957. *Sevocomm - Telecom Engineering*. [Online] Sevocomm, GmbH, 16. Říjen 2020. [Citace: 16. Únor 2021.] <https://sevocomm.com/2020/10/16/the-history-of-cad-cam-since-1957/>.
6. **Kulkarni, Rahul.** Evolution of CAD — From light pens to Synchronous Technology! *Medium - Technical Illustration*. [Online] Medium, 4. Březen 2017. [Citace: 1. Březen 2021.] <https://medium.com/technical-illustration/evolution-of-cad-from-light-pens-to-synchronous-technology-549cc8eef5d0>.
7. **Moore, Bethany.** How CAD Has Evolved Since 1982. *Scan2CAD*. [Online] Avia Systems, 23. Únor 2017. [Citace: 16. Únor 2021.] <https://www.scan2cad.com/cad/cad-evolved-since-1982/>.
8. **Siemens Digital Industries Software.** PLM Components - Parasolid. *Siemens Digital Industries Software*. [Online] Siemens Digital Industries Software, 2021. [Citace: 1. Březen 2021.] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/plm-components/parasolid.html>.
9. **FlightGlobal.** Boeing 777 Aircraft Profile. *FlightGlobal*. [Online] FlightGlobal, 1. Leden 2008. [Citace: 3. Březen 2021.] <https://www.flightglobal.com/boeing-777-aircraft-profile/76641.article>.

10. **Johnson, Nancy Spurling.** SolidWorks World 2010: Clouds, Macs, Movie Making, and more. *Cadalyst*. [Online] Longitude Media, LLC, 10. Únor 2010. [Citace: 3. Březen 2021.] <https://www.cadalyst.com/sww2010>.
11. **Propel PLM, Inc.** PDM vs PLM: What's the Difference? *Propel PLM*. [Online] Propel PLM, Inc., 2020. [Citace: 27. Březen 2021.] <https://www.propelplm.com/articles/pdm-vs-plm-whats-the-difference>.
12. **SharePLM.** Back to Basics: Defining PDM, PLM and PIM. *SharePLM*. [Online] SharePLM, 20. Červenec 2020. [Citace: 27. Březen 2021.] <https://shareplm.com/back-to-basics-pdm-plm-pim/>.
13. **Mazlová, Tamara.** PLM systémy pro řízení životního cyklu výrobku. *SystemOnline*. [Online] CCB, s.r.o., 6. Září 2009. [Citace: 23. Březen 2021.] <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/plm-systemy-pro-rizeni-zivotniho-cyklu-vyrobku.htm>.
14. **Mareš, Pavel.** Skrytý potenciál v zavedeném PLM systému. *CAD.cz*. [Online] CAD.cz, Srpen 2007. [Citace: 7. Duben 2021.] <https://www.cad.cz/pdmplm/7-2007/1375-skryty-potencial-v-plm-systemu.html>.
15. **Propel PLM, Inc.** Product Lifecycle Management. *Propel PLM*. [Online] Propel PLM, Inc., 2020. [Citace: 18. Únor 2021.] <https://www.propelplm.com/articles/what-is-product-lifecycle-management>.
16. **Siemens, s.r.o.** Siemens uvádí na trh moderní cloudové PLM řešení Teamcenter X jako službu. *Siemens Česká republika*. [Online] Siemens, s.r.o., 5. Říjen 2020. [Citace: 23. Březen 2021.] <https://www.siemens.cz/press/siemens-uvadi-na-trh-moderni-cloudove-plm-reseni-teamcenter-x-jako-sluzbu>.
17. **Junying Metal Manufacturing Co., Limited.** Difference Between 2D and 3D CAD Drawing | Advantages of 3D CAD over 2D. *CNC Lathing*. [Online] Junying Metal Manufacturing Co., Limited, 4. Červen 2020. [Citace: 18. Únor 2021.] <https://www.cnclathing.com/guide/difference-between-2d-and-3d-cad-drawing-advantages-of-3d-cad-over-2d-cnclathing>.
18. **Barfield, Rose.** 2D vs 3D CAD. *Bricsys Blog*. [Online] Bricsys NV., 2020. [Citace: 25. Duben 2021.] <https://blog.bricsys.com/2d-vs-3d-cad/>.

19. **Fenton, Darren.** 3D CAD vs 2D CAD: Benefits and When Will I Need Them. *Outsource CAD*. [Online] Outsource CAD, 5. Listopad 2018. [Citace: 25. Duben 2021.] <http://www.outsourcecad.co.uk/cad-outsourcing/3d-cad-vs-2d-cad-benefits/>.
20. **Kepos, Paula a Derdak, Thomas.** *Internation Directory of Company histories, vol. 10*. Detroit : St. James Press, 1994. ISSN: 1557-0126.
21. **Vault.com, Inc.** About Autodesk, Inc. *Vault*. [Online] Vault.com, Inc., 2020. [Citace: 20. Únor 2021.] <https://www.vault.com/company-profiles/computer-software/autodesk-inc.>
22. **Autodesk, Inc.** Autodesk Products. *Autodesk*. [Online] Autodesk, Inc., 2021. [Citace: 20. Únor 2021.] <https://www.autodesk.com/products/>.
23. **Charter College.** Who Uses AutoCAD and Why Is It Important? *Charter College*. [Online] Charter College, 12. Srpen 2020. [Citace: 2. Květen 2020.] <https://www.chartercollege.edu/news-hub/who-uses-autocad-and-why-it-important.>
24. **Inc., Autodesk.** Software and Services for Education | Autodesk Education Community. *Autodesk*. [Online] Autodesk Inc., 2021. [Citace: 2. Květen 2021.] <https://www.autodesk.com/education/home.>
25. **Autodesk, Inc.** Porovnat AutoCAD a AutoCAD LT. *Autodesk*. [Online] Autodesk, Inc., 2021. [Citace: 2. Květen 2021.] <https://www.autodesk.cz/products?compare=autocad&compare=autocad-lt.>
26. **Siemens Digital Industries Software.** 3D CAD Software. *Siemens Digital Industries Software*. [Online] Siemens, 2021. [Citace: 12. Duben 2021.] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/3d-cad/21907.>
27. **Davies, Jack.** 3D modeling CAD software. *3D HUBS*. [Online] 3D HUBS B.V., 2020. [Citace: 12. Duben 2021.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-modeling-cad-software/>.
28. **Moore, Bethany.** A Brief History Of SolidWorks. *Scan2CAD*. [Online] Avia Systems, 7. Prosinec 2017. [Citace: 26. Duben 2021.] <https://www.scan2cad.com/cad/solidworks-history/>.
29. **Develop3D.** Solidworks 2020 Review. *Develop3D*. [Online] X3DMedia, 5. Listopad 2019. [Citace: 26. Duben 2021.] <https://develop3d.com/reviews/review-solidworks-2020-3d-cad-simulation-design-manufacturing/>.



30. **Capitol Technology University.** What is SOLIDWORKS? *Capitol Technology University*. [Online] Capitol Technology University, 2021. [Citace: 26. Duben 2021.] <https://www.capttechu.edu/blog/solidworks-mechatronics-design-and-engineering-program>.
31. **Mackay, Rod.** SolidWorks Packages Comparison. *The Javelin Blog*. [Online] Javelin Technologies Inc., 20. Červenec 2018. [Citace: 3. Květen 2021.] <https://www.javelin-tech.com/blog/2018/07/solidworks-packages-comparison/>.
32. **Dassault Systèmes SolidWorks Corporation.** SolidWorks | How to Buy. *SolidWorks*. [Online] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2021. [Citace: 3. Květen 2020.] <https://www.solidworks.com/how-to-buy>.
33. **Cleverbridge.** Cleverbridge - Online Store. *Cleverbridge | Global Ecommerce Solutions Company*. [Online] Cleverbridge AG, 2021. [Citace: 3. Květen 2021.] <https://www.cleverbridge.com/1566/purl-StudentEdition>.
34. **Chen, Shen-Yeh.** The Unofficial History of Ansys. *FEA Optimization*. [Online] 3. Prosinec 2006. [Citace: 23. Únor 2021.] <https://www.fea-optimization.com/ansys/ANS-history.txt>.
35. **Roush, Wade.** SpaceClaim Captures \$5 Million Series D Funding to “Democratize” 3D Modeling. *Xconomy*. [Online] Xconomy, Inc., 13. Duben 2010. [Citace: 7. Duben 2021.] <https://xconomy.com/boston/2010/04/13/spaceclaim-captures-5-million-series-d-funding-to-democratize-3d-modeling/>.
36. **INAS.** Ansys SpaceClaim. *INAS - Power to change*. [Online] INAS S.A., 2020. [Citace: 7. Duben 2021.] <https://www.inas.ro/en/ansys-3d-design/discovery-spaceclaim>.
37. **Chvátal, Jiří.** ANSYS SpaceClaim - efektivní, rychlé a snadné modelování. *MM Průmyslové spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 16. Listopad 2016. [Citace: 7. Duben 2021.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/ansys-spaceclaim-efektivni-rychle-a-snadne-modelovani>.
38. **EDRMedeso.** ANSYS Discovery. *EDRMedeso*. [Online] 2020. [Citace: 3. Květen 2021.] <https://edrmedeso.com/news/new-e-store-ansys-discovery/>.
39. **Harish, Ajay.** Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained. *Simscale - Simulation software reinvented for the web*. [Online] Simscale, 20. Prosinec 2020. [Citace: 13. Duben 2021.] <https://www.simscale.com/blog/2016/10/what-is-finite-element-method/>.

40. **Giraldo, Guillermo.** FEA For Beginners. *Simscale - Simulation software reinvented for the web*. [Online] Simscale, 20. Prosinec 2020. [Citace: 10. Duben 2021.]  
<https://www.simscale.com/blog/2019/05/fea-for-beginners/>.
41. **Wahab, Magd Abdel.** *The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints*. Gent : DEStech Publications, Inc, 2014. ISBN: 978-1-60595-096-9.
42. **Abbey, Tony.** ANSYS Workbench 19.2. *Digital Engineering 24/7*. [Online] Peerless Media, LLC, 25. Leden 2019. [Citace: 13. Březen 2021.]  
<https://www.digitalengineering247.com/article/ansys-workbench-19.2>.
43. **T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto.** *Engineering Analysis with ANSYS Software*. Newton, MA : Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN: 9780750668750.
44. **Lee, Huei-Huang.** *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2020*. Kansas, USA : SSDC Publications, 2020. ISBN: 9781630574017.
45. **Ansys Inc.** Ansys Student - Free Software Download. *Ansys*. [Online] Ansys Inc., 2021. [Citace: 20. Březen 2021.] <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>.
46. **Techsoft Engineering.** Ansys Mechanical Enterprise. *Techsoft Engineering*. [Online] TechSoft Engineering, spol. s r.o., 2021. [Citace: 3. Květen 2021.] <https://www.techsoft-eng.cz/software/ansys-mechanical-enterprise>.
47. **SVS FEM s.r.o.** ANSYS HPC. *SVS FEM - Your partner in computing*. [Online] SVS FEM s.r.o., 2020. [Citace: 3. Květen 2021.] <https://www.svsfem.cz/produkty/ansys-hpc>.
48. **American Medical Association.** Ophthalmology. *American Medical Association*. [Online] American Medical Association, 28. Březen 2020. [Citace: 30. Duben 2021.]  
<https://freida.ama-assn.org/specialty/ophthalmology>.
49. **Ivan Dylevský, Petr Ježek.** Stavba oka. *Základy funkční anatomie člověka*. [Online] 2. Květen 2012. [Citace: 2. Květen 2021.] <http://vos.palestra.cz/skripta/anatomie/15a2a5.htm>.
50. **Barbara Cassin, Sheila A.B. Solomon, Melvin L. Rubin.** *Dictionary of Eye Terminology*. Gainesville, Florida : Triad Pub Co, 1990. ISBN: 978-0937404331.
51. **Artal, Pablo.** *Handbook of Visual Optics, Volume One: Fundamentals and Eye Optics*. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2017. ISBN: 9781482237856.
52. **Velký lékařský slovník.** Zinnův proužek. *Velký lékařský slovník*. [Online] Maxdorf, 2020. [Citace: 30. Duben 2021.] <http://lekarske.slovníky.cz/pojem/zinnuv-prouzek>.
53. **Karolína Skorkovská, Šárka Skorkovská.** Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky sítnice. *Česká a slovenská oftalmologie*. 2015, Sv. 71, 3.

54. **Jose Luis Güell, Merce Morral, Daniel Kook, Thomas Kohlen.** Phakic intraocular lenses. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2010, Sv. 36, 11.
55. **Barsam, Allan.** Excimer laser refractive surgery versus phakic intraocular lenses for the correction of moderate to high myopia. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2014, Sv. 6, 6.
56. **VISUS, spol. s r. o.** Refrakční nitrooční operace. *VISUS, spol. s r. o.* [Online] [Citace: 30. Duben 2021.] <https://www.ocni-visus.cz/operacni-vykony/refrakcni-nitroocni-operace/>.
57. **Heiting, Gary.** Astigmatism and cataract? A toric IOL can fix both. *All About Vision*. [Online] AAV Media, LLC, Zář 2016. [Citace: 28. Duben 2021.] <https://www.allaboutvision.com/conditions/toric-iols.htm>.
58. **Anton, Milan.** *Refrakční vady a jejich řešení*. Brno : Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2004. ISBN: 80-7013-402-X.
59. **Jing-Li Liang, Fang Tian, Hong Zhang, He Teng.** Combination of Toric and multifocal intraocular lens implantation in bilateral cataract patients with unilateral astigmatism. *International Journal of Ophthalmology*. 2016, Sv. 9, 12.
60. **McMahon, Jeffrey F.** Extended Depth of Focus IOLs. *American Academy of Ophthalmology*. [Online] American Academy of Ophthalmology, 7. Zář 2021. [Citace: 30. Duben 2021.] [https://eyewiki.aao.org/Extended\\_Depth\\_of\\_Focus\\_IOLs](https://eyewiki.aao.org/Extended_Depth_of_Focus_IOLs).
61. **John, Thomas.** Axis marking technique optimizes toric IOL centration. *Healio News*. [Online] Healio, 10. Listopad 2010. [Citace: 9. Květen 2021.] <https://www.healio.com/news/ophthalmology/20120331/axis-marking-technique-optimizes-toric-iol-centration>.
62. **Alcon, Novartis Division.** AcrySof IOL (Multi-piece). *Beye | The Eye Care Market Research Engine*. [Online] Beye, LLC. [Citace: 9. Květen 2021.] <https://www.beye.com/product/acrysof-iol>.
63. **Kierstan Boyd, Stephen N. Lipsky.** IOL Implants: Lens Replacement After Cataracts. *American Academy of Ophthalmology*. [Online] American Academy of Ophthalmology, 19. Duben 2021. [Citace: 28. Duben 2021.] <https://www.aao.org/eye-health/diseases/cataracts-iol-implants>.