



## Diplomová práce

# Optimalizace 3D scény pro rendering

*Studijní program:*

N0688A140016 Systémové inženýrství a informatika

*Autor práce:*

**Bc. Nikolas Hák**

*Vedoucí práce:*

Ing. Petr Weinlich, Ph.D.  
Katedra informatiky

Liberec 2023





## Zadání diplomové práce

# Optimalizace 3D scény pro rendering

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Nikolas Hák**

*Osobní číslo:*

E20000306

*Studijní program:*

N0688A140016 Systémové inženýrství a informatika

*Zadávací katedra:*

Katedra informatiky

*Akademický rok:*

2021/2022

### Zásady pro vypracování:

1. Softwarové nástroje pro 3D rendering
2. Klíčové faktory 3D renderingu ve vybraných odvětvích
3. Možnosti optimalizace scény 3D renderingu
4. Návrh optimalizačních kroků
5. Zhodnocení a doporučení

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:* 65 normostran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- KERLOW, Isaac Victor, 2011. *Mistrovství 3D animace: [ovládněte techniky profesionálních filmových tvůrců!]*. Brno: Computer Press, Mistrovství. ISBN 978-80-251-2717-9.
- CARDOSO, Jamie, 2017. *3D photorealistic rendering: interiors & exteriors with V-Ray and 3ds Max*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-138-78072-9.
- AHEARN, Luke, 2017. *3D game environments: create professional 3D game worlds*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-138-92002-6.
- ZEMAN, Nicholas Bernhardt, 2015. *Essential skills for 3D modeling, rendering, and animation*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis. ISBN 978-1-4822-2412-2.
- PROQUEST, 2021. Databáze článků ProQuest [online]. Ann Arbor, MI, USA: ProQuest. [cit. 2021-09-26]. Dostupné z: <http://knihovna.tul.cz>

Konzultant – Miroslav Machač, ŠKODA AUTO - Technický vývoj & virtuální realita

*Vedoucí práce:* Ing. Petr Weinlich, Ph.D.  
Katedra informatiky

*Datum zadání práce:* 1. listopadu 2021  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 31. srpna 2023

L.S.

doc. Ing. Aleš Kocourek, Ph.D.  
děkan

Ing. Petr Weinlich, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.



# **Optimalizace 3D scény pro rendering**

## **Anotace**

Tématem této diplomové práce je 3D rendering a jeho optimalizace. Teoretická část práce se věnuje představení populárních softwarových nástrojů pro vizualizace a klíčovými faktorům v rámci renderingu pro jednotlivá odvětví. Dále popisuje moderní optimalizační kroky a cesty, jak je možné model či scénu pro 3D rendering optimalizovat. Praktická část je zaměřena na optimalizaci náročného modelu pro automobilový průmysl na třech různých zařízeních s rozdílným výkonem. Finálním krokem práce je vyhodnocení optimalizace z uživatelského i technického hlediska a popsání možných chyb.

## **Klíčová slova**

3D model, decimace trojúhelníků, optimalizace, pracovní stanice, renderování, softwarové nástroje, vizualizace, VRUT.

## **3D scene optimization for rendering**

### **Annotation**

The topic of the Diploma thesis is 3D rendering and its optimization. The theoretical part introduces popular software tools for visualization and key factors in rendering for different industries. Furthermore, it describes modern steps and ways to optimize 3D models or scenes for rendering. The practical part of the thesis focuses on enhancing a complex model for the automotive industry on three different devices with varying performance. The final step is to evaluate the optimization from both a user and technical perspective and describe possible errors.

### **Key Words**

3D model, triangle decimation, optimization, workstation, rendering, software tools, visualization, VRUT.



## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Weinlichovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, jeho trpělivost, ochotu, veškeré cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích této diplomové práce. Mé poděkování dále patří zaměstnancům společnosti ŠKODA AUTO a.s., konkrétně kolegům z oddělení FIP/7 za velkou podporu a rady vedoucí k úspěšnému dokončení této práce. A nakonec bych chtěl poděkovat celé mé rodině a dobrým přátelům, kteří mě během studia podporovali a motivovali.



# Obsah

Seznam obrázků .....	14
Seznam tabulek .....	16
Seznam zkratk .....	18
Úvod .....	19
<b>1 Softwarové nástroje pro 3D rendering .....</b>	<b>21</b>
1.1 3ds Max.....	22
1.2 Maya .....	23
1.3 SketchUp .....	25
1.4 Cinema 4D .....	26
1.5 Blender.....	28
1.6 VRED .....	29
1.7 Rhinoceros 3D .....	31
1.8 SelfCAD .....	32
1.9 VRUT .....	34
1.10 Arnold .....	35
1.11 Corona.....	36
1.12 Redshift.....	38
1.13 V-ray .....	39
<b>2 Klíčové faktory 3D renderingu ve vybraných odvětvích .....</b>	<b>41</b>
2.1 Filmová tvorba.....	41
2.2 Počítačové hry .....	43
2.3 Produktová vizualizace.....	44
2.3.1 Automobilový průmysl .....	46
2.4 Architektonická vizualizace .....	47
2.5 Klíčové faktory.....	48
2.5.1 Snímková frekvence.....	49
2.5.2 Render time .....	49
2.5.3 Vizuální stránka .....	50
2.5.4 Počet trojúhelníku .....	51
2.5.5 Rozlišení.....	51
2.5.6 Anti-aliasing a samples .....	51
<b>3 Možnosti optimalizace scény 3D renderingu.....</b>	<b>54</b>

3.1	Decimace trojúhelníků (redukce).....	54
3.2	Odstranění nepotřebné geometrie .....	56
3.3	Použití instancí místo kopií .....	57
3.4	Level of detail.....	58
3.5	Redukce textur .....	59
3.6	Snížení komplexity hierarchie .....	60
3.7	Spojení geometrie .....	61
3.8	Vyčištění scény a modelu .....	62
3.9	Správně otočené normály .....	62
3.10	Optimalizace osvětlení a stínů.....	63
4	Návrh optimalizačních kroků .....	66
4.1	Parametry optimalizovaného dílu .....	67
4.2	Parametry testovaných zařízení .....	67
4.3	Výkon bez optimalizace .....	71
4.4	Modul optimize .....	72
4.4.1	Funkce s efektem na data.....	73
4.4.2	Kombinace všech funkcí s efektem na data .....	74
4.4.3	Funkce bez efektu na data.....	74
4.5	Decimace trojúhelníků.....	75
4.5.1	Decimace s parametrem -10 .....	77
4.5.2	Decimace s parametrem -20 .....	77
4.5.3	Decimace s parametrem -30 .....	77
4.5.4	Decimace s parametrem -40 .....	78
4.5.5	Decimace s parametrem -45 .....	79
4.5.6	Decimace s parametrem -50 .....	80
4.5.7	Redukce velikosti souborů.....	82
4.6	Kombinace decimace a funkcí .....	83
4.7	Kombinace decimace, funkcí a manuálního umazání geometrií.....	83
5	Zhodnocení a doporučení .....	85
5.1	Software VRUT z hlediska optimalizace .....	85
5.2	Parametr decimace.....	86
5.3	Uživatelská a časová náročnost funkcí.....	86
5.4	Možné chyby v procesu optimalizace .....	88
5.5	Zhodnocení optimalizace .....	89

5.6 Doporučení.....	95
Závěr.....	96
Seznam použité literatury .....	98
Seznam příloh.....	103

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Render krajiny ze softwaru 3ds Max.....	22
Obrázek 2 - Render animované postavy ze softwaru Maya.....	24
Obrázek 3 - Návrh budovy a uživatelské prostředí v softwaru SketchUp .....	25
Obrázek 4 - Render fantasy krajiny ze softwaru Cinema 4D .....	27
Obrázek 5 - Render animované postavy a uživatelské prostředí v softwaru Blender .....	29
Obrázek 6 - Render automobilu v softwaru VRED .....	30
Obrázek 7 - Render prstenu v softwaru Rhinoceros 3D .....	31
Obrázek 8 - Render soukolí ze softwaru SelfCAD .....	33
Obrázek 9 - Render z filmu Thor: Ragnarok pomocí enginu Arnold.....	35
Obrázek 10 - Render interiéru pomocí enginu Corona .....	37
Obrázek 11 - Render ze hry Overwatch pomocí enginu Redshift .....	38
Obrázek 12 - Render interiéru pomocí enginu V-ray .....	39
Obrázek 13 - Fotka z natáčení filmu Avengers se zeleným plátnem a oblekem pro snímání pohybu.....	42
Obrázek 14 - Produktová vizualizace cereálií před a po nanesení textur .....	45
Obrázek 15 - Architektonická vizualizace .....	47
Obrázek 16 - Anti-aliasing v režimu Vulcan – vlevo anti-aliasing 1, vpravo anti-aliasing 8.....	52
Obrázek 17 - Samples v režimu raytracingu – vlevo samples hodnoty 1, vpravo samples hodnoty 8 .....	52
Obrázek 18 - Samples v režimu raytracingu – samples hodnoty 500 .....	53
Obrázek 19 - Trojúhelníková síť předního skla – 15 988 trojúhelníků .....	55
Obrázek 20 - Trojúhelníková síť předního skla po redukci parametrem -45, 1634 trojúhelníků.....	55
Obrázek 21 - Středový řez automobilem se zvýrazněnými hranami.....	56
Obrázek 22 - Dopad použití instancí místo kopií na zabrané místo, využití RAM a čas vykreslování.....	57
Obrázek 23 - Aplikace LOD pomocí redukce trojúhelníků.....	58
Obrázek 24 - Spojení geometrie dveří a kliky v softwaru VRUT .....	61
Obrázek 25 - Model automobilu se zapečenými stíny .....	64
Obrázek 26 - Model automobilu bez zapečených stínů .....	65
Obrázek 27 - Izometrický přední pohled pro testování.....	66
Obrázek 28 - Pracovní stanice HP Z8 G4 .....	68
Obrázek 29 - Přenosná pracovní stanice HP Zbook 15 Fury G7 .....	68

Obrázek 30 - HP EliteBook 840 G6 .....	69
Obrázek 31 - Výsledky benchmark testů grafických karet .....	70
Obrázek 32 - Výsledky benchmark testů procesorů .....	70
Obrázek 33 - Graf kolísání FPS během měření.....	71
Obrázek 34 - Modul optimize.....	72
Obrázek 35 - Chybné odstranění geometrií při použití funkce SimplifyStructure .....	75
Obrázek 36 - Poškození stínů po decimaci s parametrem -10 .....	76
Obrázek 37 - Chyba v předpočítaných stínech na poznávací značce .....	78
Obrázek 38 - Chyba v předpočítaných stínech na kapotě v okolí antény .....	78
Obrázek 39 - Lehká deformace geometrie předních dveří při decimaci s parametrem -45 .....	79
Obrázek 40 - Poškození stínů po decimaci s parametrem -50 .....	80
Obrázek 41 - Chyby v předpočítaných stínech po decimaci s parametrem -50.....	81
Obrázek 42 - Deformace geometrie předních dveří po decimaci s parametrem -50 .....	81
Obrázek 43 - Deformace malého prvku – klika při decimaci s parametrem -50.....	82
Obrázek 44 - Přední pohled na automobil po manuálním umazání geometrií.....	83
Obrázek 45 - Zadní pohled na automobil po manuálním umazání geometrií .....	84
Obrázek 46 - Graf snížení počtu trojúhelníků podle parametru decimace.....	86
Obrázek 47 - Graf trvání decimace na pracovní stanici podle parametru decimace.....	87
Obrázek 48 - Graf počtu snímků za vteřinu na modelu bez optimalizace .....	89
Obrázek 49 - Graf počtu snímků za vteřinu po použití funkcí s efektem na data .....	90
Obrázek 50 - Graf počtu snímků za vteřinu po použití decimace s parametrem -45 .....	91
Obrázek 51 - Graf počtu snímku za vteřinu po použití decimace s parametrem -45 + všechny funkce.....	92
Obrázek 52 - Graf počtu snímku za vteřinu po použití decimace s parametrem -45 + všechny funkce + manuální umazání .....	93
Obrázek 53 - Procentuální zvýšení FPS na pracovní stanici v porovnání s daty bez optimalizace....	93
Obrázek 54 - Procentuální zvýšení FPS na přenosné pracovní stanici v porovnání s daty bez optimalizace .....	94
Obrázek 55 - Procentuální zvýšení FPS na kancelářském notebooku v porovnání s daty bez optimalizace .....	95

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Cena předplatného 3ds Max.....	23
Tabulka 2 - Výhody a nevýhody aplikace 3ds Max.....	23
Tabulka 3 - Výhody a nevýhody aplikace Maya.....	24
Tabulka 4 - Cena předplatného SketchUp.....	26
Tabulka 5 - Výhody a nevýhody aplikace SketchUp.....	26
Tabulka 6 - Cena předplatného Cinema 4D.....	27
Tabulka 7 - Výhody a nevýhody aplikace Cinema 4D.....	28
Tabulka 8 - Výhody a nevýhody aplikace Blender.....	29
Tabulka 9 - Cena předplatného VRED.....	30
Tabulka 10 - Výhody a nevýhody aplikace VRED.....	30
Tabulka 11 - Cena předplatného Rhinoceros 3D.....	32
Tabulka 12 - Výhody a nevýhody aplikace Rhinoceros 3D.....	32
Tabulka 13 - Cena předplatného SelfCAD.....	33
Tabulka 14 - Výhody a nevýhody aplikace SelfCAD.....	33
Tabulka 15 - Cena předplatného enginu Arnold.....	36
Tabulka 16 - Výhody a nevýhody enginu Arnold.....	36
Tabulka 17 - Cena předplatného enginu Corona.....	37
Tabulka 18 - Výhody a nevýhody enginu Corona.....	37
Tabulka 19 - Cena předplatného enginu Redshift.....	39
Tabulka 20 - Výhody a nevýhody enginu Redshift.....	39
Tabulka 21 - Cena předplatného enginu V-ray.....	40
Tabulka 22 - Výhody a nevýhody enginu V-ray.....	40
Tabulka 23 - Výkon bez optimalizace.....	71
Tabulka 24 - Kombinace optimalizačních funkcí s efektem na data.....	74
Tabulka 25 - Decimace -10.....	77
Tabulka 26 - Decimace -20.....	77
Tabulka 27 - Decimace -30.....	78
Tabulka 28 - Decimace -40.....	78
Tabulka 29 - Decimace -45.....	80
Tabulka 30 - Decimace -50.....	82
Tabulka 31 - Redukce velikosti souborů.....	82
Tabulka 32 - Decimace -45 a všechny funkce.....	83



Tabulka 33 - Decimace -45, všechny funkce a manuální umazání geometrií .....	84
Tabulka 34 - Procentuální redukce trojúhelníků podle parametru decimace .....	86

## Seznam zkratek

AA	Anti-aliasing
ACMR	Average Cache Miss Ratio
API	Application Programming Interface
CAD	Computer aided design
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CGI	Computer-generated imagery
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
GPU	Graphics processing unit
MEL	Maya Embedded Language
OS	Operating system
PBR	Physically Based Rendering
TUL	Technická univerzita v Liberci

## Úvod

S rozvojem vizualizačních technologií a počítačové grafiky jsme se dostali do doby, kdy jsou vyrenderované obrázky běžnou součástí našeho každodenního života. Tento trend, který začal ve filmu a architektuře, se dnes rozšířil do všech oblastí, od průmyslového designu a reklamy po videohry a virtuální realitu. Dříve se takové vizualizace tvořily pouze v rozsáhlých grafických studiích, které disponovaly potřebným výpočetním výkonem a odbornými znalostmi. V dnešní době se však díky nárůstu výkonu počítačů, zvyšování dostupnosti nástrojů a vzdělávacích materiálů tvorba vizualizací stává přístupnější pro širší veřejnost. Není již tedy potřeba mít k dispozici celý tým specialistů s profesionálními nástroji, aby bylo možné vytvořit kvalitní vizualizaci.

V oblasti vizualizace se stává stále důležitějším faktorem efektivita tvorby, zejména v dnešní době, kdy konkurence v této oblasti roste. Proto je nezbytné najít způsob, jak v co nejkratším čase vytvořit co nejvíce vizualizací. Klíčovým faktorem ovlivňujícím rychlost tvorby je proces 3D renderingu, který vyžaduje nejen dostatečný výkon hardwaru, ale také správnou optimalizaci celého procesu pro zpracování velkého množství grafických dat v reálném čase s co nejvyšší kvalitou.

Úvodní kapitola této diplomové práce má za cíl seznámit čtenáře se softwarovými nástroji, které se používají pro tvorbu 3D vizualizací. V této části práce jsou představeny nejpopulárnější programy, které jsou k dispozici na trhu, a to včetně popisu jejich známých výhod a nevýhod. Dále je popsáno, v jakých případech jsou jednotlivé programy nejvhodnější pro konkrétní projekty, a jaké jsou náklady spojené s jejich používáním. Následující část této diplomové práce se zaměřuje na detailní rozbor jednotlivých průmyslových odvětví a na to, jak konkrétně využívají 3D rendering v praxi. Každé odvětví má své specifické nároky na výslednou vizualizaci a proces její tvorby, a proto jsou zde popsány i klíčové faktory, na které se odvětví zaměřují a co přesně znamenají.

Další část této diplomové práce se zaměřuje na konkrétní kroky, které mohou být použity pro optimalizaci 3D renderingu. Tyto kroky jsou aplikovatelné v různých odvětvích průmyslu a zahrnují například optimalizaci geometrie, textur, nebo osvětlení. V následující kapitole je představen praktický návrh a provedení optimalizačních kroků pro vizualizaci z prostředí automobilového průmyslu. Optimalizační kroky byli testovány na třech zařízeních o rozdílném výkonu. A hlavním cílem bylo dosažení co nejlepších snímků za vteřinu při vykreslování animace v reálném čase.

V poslední části této diplomové práce je provedeno zhodnocení získaných dat a výsledků z praktické optimalizace. Jsou zde popsány a vyhodnoceny všechny kroky optimalizace a jejich účinnost. Dále je zde čtenář seznámen s použitím softwaru, jeho náročností a možnými chybami, se kterými je možné se setkat. Posuzuje se také dosažená úroveň optimalizace a její srovnání s původními výsledky.

# 1 Softwarové nástroje pro 3D rendering

Softwarové nástroje pro 3D rendering pomáhají profesionálům v oblasti designu změnit jejich prosté trojrozměrné modely na fotorealisticky vypadající díla. V letech minulých, když už to začala dovolovat technologie, byla metoda 3D renderování využívána jen u vysoce nákladných projektů. Nyní je tato metoda běžným prostředkem k prezentaci produktů. Důvodem je, že zákazníci se vyvíjejí společně s technologií. Chtějí vidět, že zvládnete vytvořit realistický návrh, ať už se jedná o herní model, architekturu nebo produkt. To vede k potřebě držení kroku s konkurencí. Je nutné používat ty nejlepší softwarové nástroje pro 3D rendering, které vám umožní realisticky prezentovat vaše modely s větším detailem a přesností.

Renderování je proces tvorby nefotorealistického nebo fotorealistického obrázku modelu za pomoci výpočtu počítačového programu. Pro fotorealistické renderování se proces tvorby dvojrozměrných nebo trojrozměrných obrázků modelů či návrhů zaměřuje na co nejlepší ilustraci toho, jak bude objekt vypadat ve skutečnosti. Pro co nejrealističtější vykreslování má software speciální funkce jako reálné textury, efekty počasí, rozmazaný pohyb, realistické osvětlení a mnoho dalších. Před renderováním je však nutné návrh vymodelovat v softwaru pro 3D modelování nebo zkusit sehnat model v databankách 3D modelů. Kvalita a vlastnosti 3D modelu hrají velkou roli v procesu renderování. Pokud je 3D model nekvalitně vytvořený, může například dojít k problémům s optimalizací během renderingu nebo ke špatnému nanesení textur.

V současné době na trhu existuje obrovské množství softwarových nástrojů určených pro 3D rendering. Produkty specializují své funkce pro různá odvětví, která často potřebují vždy trochu něco jiného. V potaz je také nutné brát komplexnost softwaru. Zatímco některý software se soustředí pouze na rendering, jiný může mít podobu kompletního balíčku, který zvládne i 3D modelování a konečnou postprodukcí pro finalizaci vyrenderovaného snímku. Software, jehož úlohou je pouze rendering nazýváme renderovacím enginem. Nejčastěji ho najdeme v podobě rozšíření do základního 3D programu, který rendering ve své podstatě zvládá, ale ne tak dobře jako software jehož podstata je zaměřená na fotorealistický rendering. V následujících kapitolách budou zanalyzovány populární nástroje v této oblasti.

## 1.1 3ds Max

Jako jeden z nejoblíbenějších a nejstarších programů pro 3D rendering lze považovat 3ds Max od společnosti Autodesk založené roku 1982. Původní program nesoucí název 3D Studio však Autodesku nepatřil. Až začátkem 90. let 20. století byl program odkoupen od společnosti Yost Group. Díky větším investicím byl software mnohonásobně vylepšen a stal se jedním z nejpokročilejších své doby. 3ds Max v sobě zahrnuje spoustu vyspělých nástrojů pro 3D modelování, dynamickou simulaci, částicové systémy, renderovací pluginy a mnoho dalších. Velice dlouho 3ds Max kraloval jako jeden z nejpoužívanějších softwarů pro rendering s komerčním využitím. Možnosti, které nabízí, hned našly uplatnění ve filmovém a herním průmyslu, ale také i u designérů či architektů. V současnosti je stále hojně využíván v oblasti modelování a nehybných vizualizací, ale tvorba animací se spíše přesouvá k ostatním a konkurenčním produktům, které se na tvorbu animací přímo zaměřují. (Autodesk Inc. 2023)



*Obrázek 1 Render krajiny ze softwaru 3ds Max*  
Zdroj: Verona 2023

3ds Max je k dispozici pouze pro operační systém Windows, což může být pro některé uživatele překážkou. Aktuální verze softwaru nese označení 3ds Max 2023. Software jako takový není možné koupit jednorázově navždy. Pouze předplatit na určité časové období. V následující tabulce lze vidět aktuální ceny k datu 18. 2. 2023 pro Českou republiku. (Autodesk Inc. 2023)

Tabulka 1 Cena předplatného 3ds Max

1 měsíc	1 rok	3 roky
7 133 Kč	57 064 Kč	162 631 Kč

Zdroj: Autodesk Inc. 2023

Pokud cenu srovnáme s konkurenčními produkty, tak patří mezi jedny z nejvyšších. Ale vzhledem k tomu, že 3ds Max je na trhu opravdu dlouho a je využíván profesionálními studii si tuto cenu může dovolit. Pro studenty je však všechny software od společnosti Autodesk možné využívat zdarma skrz roční studentskou licenci. Vzhledem k rozšířenosti a popularitě má 3ds Max silnou komunitu zajišťující jednoduché řešení problémů a hledání informací. Díky propojení s ostatními CAD programy, jako je například AutoCAD, je velmi snadné vizualizovat 3D modely vytvořené jinde.

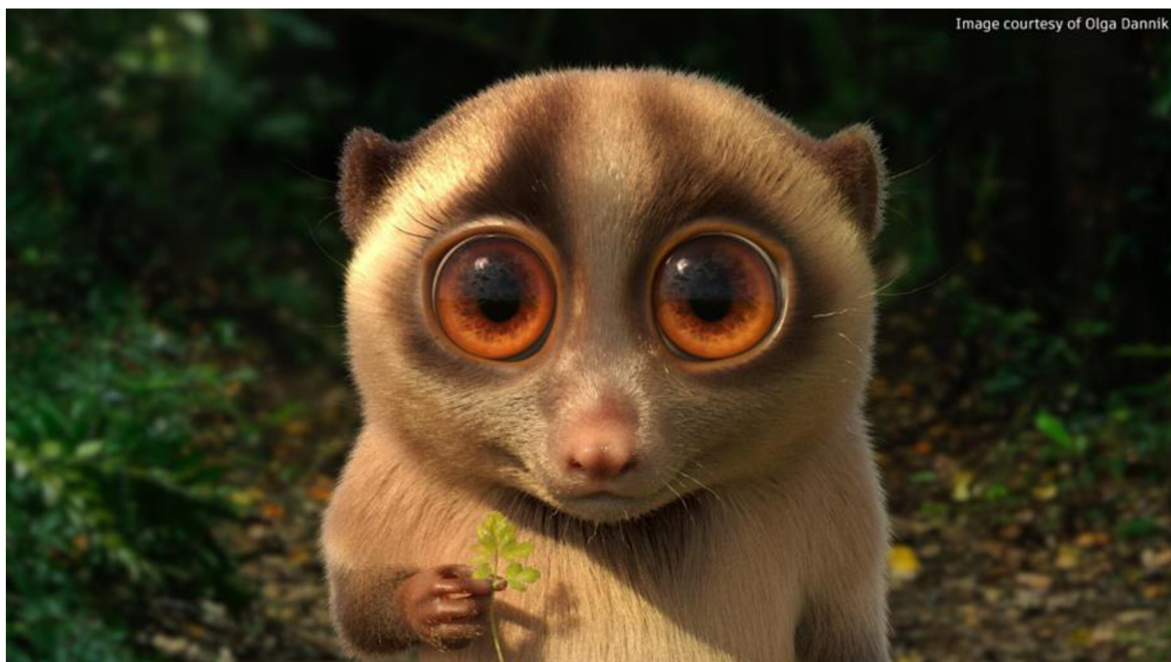
Tabulka 2 Výhody a nevýhody aplikace 3ds Max

Výhody	Nevýhody
Renderovací plugíny	Pouze OS Windows
Obrovské množství nástrojů	Vysoká cena
Pravidelné aktualizace a zlepšování	Omezená tvorba animací
Komunitní obsah	Předplatný model

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.2 Maya

Maya stejně jako 3ds Max patří pod giganta na poli 3D renderingu – Autodesk. A stejně tak pod něj nepatřila odjakživa. Za vznik softwaru, který dnes známe jako Maya, stojí spojení tří různých softwarů a společností. The Advanced Visualizer od společnosti Wavefront, Power Animator od společnosti Alias a Thomson Digital Image. Tím vzniká software Alias Studio později přejmenovaný na Maya. S postupem vývoje přibývaly funkce jako přizpůsobení pracovních postupů, grafického prostředí a také byl implementován vlastní skriptovací jazyk MEL (Maya Embedded Language). To dalo umělcům mnohem větší kontrolu nad procesem tvorby. Všechny tyto změny vedly ke zvyšování popularity až do bodu, kdy se Maya stala volbou významných studií jako Disney nebo Industrial Light & Magic. A následně pak byla využita při tvorbě vizualizací ve filmech jako Dinosaurius nebo Hledá se Nemo. Roku 2005 je pak Maya odkoupena společností Autodesk. Nyní patří k nejpoblárnějším nástrojům pro tvorbu filmových 3D efektů, animovaných filmů a videoreklamy. (Autodesk Inc. 2023)



*Obrázek 2 Render animované postavy ze softwaru Maya*

Zdroj: Dannik 2023

Maya je k dispozici pro operační systémy Windows, MacOS a Linux. Aktuální verze softwaru nese označení Maya 2023. Systém předplatného na určité časové období i ceny jsou totožné s 3ds Max, viz tabulka č. 3. K dispozici je na trhu také méně komplexní verze softwaru – Maya LT. Ta míří převážně na nezávislé herní vývojáře, kterým dává silný nástroj pro tvorbu a animaci postav, rekvizit či prostředí. A to za zlomek ceny plné verze. Tedy 1120 Kč měsíčně, nebo 8930 Kč za roční licenci. (Autodesk Inc. 2023)

*Tabulka 3 Výhody a nevýhody aplikace Maya*

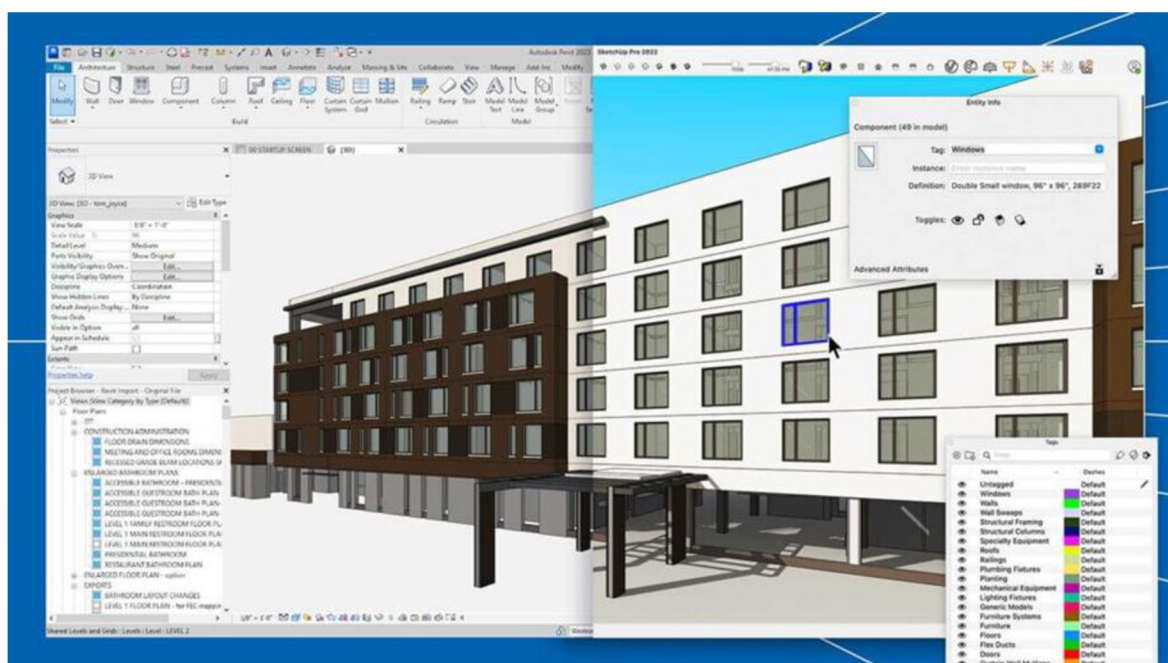
<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Animační nástroje	Náročnější na naučení
Maya LT	Vysoká cena
Přizpůsobitelnost	Předplatný model
Pravidelné aktualizace a zlepšování	

Zdroj: vlastní zpracování



### 1.3 SketchUp

SketchUp vyvinula startup společnost @Last Software roku 2000. Zamýšlen byl jako jednoduchý 3D modelingový nástroj, který lidem přiblíží a zjednoduší proces návrhu a vlastní tvorby. Hned tentýž rok vyhrává SketchUp cenu Community Choice Award. Za jeho úspěch mohla především jeho jednoduchost. V porovnání s ostatními programy si ho uživatelé osvojili mnohem rychleji. Navazujíc na úspěch začíná kolaborace s Google na tvorbě pluginu, který uživatelům umožní vložit jejich vytvořené modely budov do Google Earth. Plugin slaví úspěch a roku 2006 je společnost @Last Software a s ní i SketchUp odkoupena společností Google. Zde poprvé dochází k vypuštění méně komplexní verze zdarma po boku placené profesionální verze. Program je nadále vyvíjen, jako jeden z důležitých milníků lze považovat integraci 3D Warehouse. V doslovném překladu 3D skladiště, kde je možné hledat a stahovat veškeré 3D modely, které byly nahrány ostatními uživateli z celého světa. Roku 2012 je SketchUp odkoupen společností Trimble Inc., kterou je vlastněn dodnes. Po vzoru 3D Warehouse byl následně také implementován Extension Warehouse. Místo, odkud je možné stahovat rozšíření pro SketchUp. Tato rozšíření umožňují uživatelům přidávat do aplikace SketchUp speciální funkce, které se hodí při práci na konkrétním projektu, ale software jimi nedisponuje. Rozšíření je nespočet, od podpory pro 3D tisk, po návrhové nástroje od společnosti. (Lee 2021)



Obrázek 3 Návrh budovy a uživatelské prostředí v softwaru SketchUp

Zdroj: Trimble Inc. 2023

SketchUp je k dispozici pro operační systémy Windows a MacOS. Zároveň však všechny jeho verze běží i ve webovém prohlížeči. K dispozici jsou verze FREE, GO, PRO a STUDIO, přičemž každá verze nabízí více pokročilých funkcí jak ta předchozí. Software je možné zakoupit pomocí licence na 1 rok. (Trimble Inc. 2023)

*Tabulka 4 Cena předplatného SketchUp*

FREE	GO	PRO	STUDIO
Zdarma	2779 Kč / rok	7299 Kč / rok	16 299 Kč / rok

Zdroj: Trimble Inc. 2023

SketchUp je nejvíce využíván v návrhářském průmyslu, především architektky a interiérovými designéry. Návrháři dávají přednost uživatelsky velmi přívětivému prostředí ve srovnání s jinými aplikacemi. Zatímco některé 3D aplikace vyžadují měsíce učení, tak aplikace SketchUp se dá poměrně dobře naučit již během několika dní.

*Tabulka 5 Výhody a nevýhody aplikace SketchUp*

Výhody	Nevýhody
Cena, verze zdarma	Roční licence
Jednoduchost	Omezenější tvorba komplexních 3D
Warehouse – 3D modely, rozšíření	Horší kompatibilita s jiným softwarem
Možnost spuštění ve webovém prohlížeči	

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.4 Cinema 4D

Cinema 4D spadá pod německou společnost Maxon Computer GmbH. Ta byla založena roku 1986 třemi studenty s obrovským zapálením do počítačů. Vydávali časopisy o počítačích a pořádali programovací soutěže. V roce 1989 se do soutěže přihlašují dva bratři, kteří si ale nejsou jistí, jaký software chtějí vyvinout. A tak si hodí mincí, jestli udělají tabulkový procesor, nebo raytracer. Bez této náhody nemusela Cinema 4D nikdy vzniknout. Raytracer soutěž vyhrává. Ve vývoji se pokračuje a roku 1991 je vydán jako Fastray, předchůdce Cinema 4D. Již obsahuje grafické uživatelské prostředí a 3D průmysl uchvacuje svojí rychlostí. A roku 1993 se z něj stává první verze softwaru Cinema 4D. Mezi další důležité milníky patří, že je v roce 2000 integrován software BodyPaint 3D, což je komplexní nástroj pro texturování. V roce 2013 vstupuje Maxon do strategické aliance s Adobe. Následně je představen Cineware for After Effects, který uživatelům umožňuje nativně importovat a upravovat scény Cinema 4D v After Effects. (Maxon Computer GmbH 2023)

Cinema 4D patří k dalším softwarovým nástrojům pro 3D rendering, které si dokáží poradit téměř se vším. Ať už je jedná o organické modelování, tvorbu textur, tvorbu animací nebo renderování. Díky velice propracovaným nástrojům pro animace je Cinema 4D často využívána pro tvorbu televizní grafiky. Spolupráce s Adobe a propojení s After Effects zas udělalo Cinemu velice populární v tvorbě speciálních vizuálních efektů ve filmu. Mezi uživateli je známá pro své přívětivé uživatelské rozhraní ve srovnání s konkurenčními aplikacemi. (Maxon Computer GmbH 2023)



*Obrázek 4 Render fantasy krajiny ze softwaru Cinema 4D*

Zdroj: Frederick 2023

Cinema 4D je k dispozici pro operační systémy Windows a MacOS. Dříve byla prodávána v několika verzích odlišujících se jak funkcí, tak cenou. To bylo roku 2019 zrušeno, vzhledem k zbytečné náročnosti údržby 4 rozdílných verzí. A také kvůli zákazníkům, kteří měli problémy s výběrem vhodné verze. Aktuální verze softwaru nese označení Cinema 4D 2023. Licenci je možné platit buďto měsíčně, nebo ročně. (Maxon Computer GmbH 2023)

*Tabulka 6 Cena předplatného Cinema 4D*

<b>1 měsíc</b>	<b>1 rok</b>
2 540 Kč	18 120 Kč

Zdroj: Maxon Computer GmbH 2023

Tabulka 7 Výhody a nevýhody aplikace Cinema 4D

Výhody	Nevýhody
Propojení s Adobe	Vyšší cena
Nástroje pro animace	Předplatný model
Nástroje pro 3D tvorbu	Horší možnosti přizpůsobení
Uživatelská přívětivost	

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.5 Blender

Blender je pravděpodobně neznámější a nejoblíbenější open-source aplikace pro 3D rendering. Po neúspěšném pokusu se shareware verzí a úpadku společnosti je roku 2002 založena organizace Blender Foundation. Té se během 2 měsíců podařilo vybrat dostatečnou částku na odkoupení zdrojového kódu. A Blender je poprvé vypuštěn jakožto open-source aplikace. Tak tomu je nadále i o dvacet let později, vývoj a provoz zajišťuje Blender Foundation, přičemž vývoj jako takový stojí hlavně na dobrovolnících, kteří jsou se společností v úzkém kontaktu. (Chillingworth 2023)

Blender podporuje celý proces tvorby 3D. To znamená, že je v něm možné modelovat, animovat, simulovat částice i renderovat. Největší předností Blenderu je samozřejmě to, že je zcela zdarma, a to i ke komerčnímu využití. Přesto se svým širokým rozsahem nástrojů dokáže v určité míře konkurovat placeným softwarům pro 3D rendering. Z toho však plynou i určité nevýhody. Jelikož je to open-source, tak zrovna používaná verze nemusí být stoprocentně stabilní a je možné, že uživatel narazí na chyby častěji v porovnání s placeným softwarem. Pluginy a rozšíření jsou také tvořeny hlavně komunitou a ne společnostmi, jelikož pro ty není tvorba velkých placených pluginů do aplikace zdarma lukrativní. Blender může být skvělý start pro začátečníky, protože nabízí vše z procesu tvorby 3D zadarmo. Uživatel se tak může naučit principy tvorby 3D a renderingu, zjistit jestli mu to jde a baví ho to. A s těmito znalostmi pak může pokračovat na jiný, třeba placený software. (Chillingworth 2023)



Obrázek 5 Render animované postavy a uživatelské prostředí v softwaru Blender

Zdroj: Blender Foundation 2023

Blender je k dispozici pro operační systémy Microsoft Windows, MacOS a Linux. Aktuální verze softwaru nese označení Blender 3.3 LTS. (Blender foundation 2023)

Tabulka 8 Výhody a nevýhody aplikace Blender

Výhody	Nevýhody
Open-source a zdarma	Není to standart v oboru
Rozsah nástrojů	Složitější start pro začátečníky
Komunitní podpora	Horší stabilita/chyby
Časté aktualizace	Méně přehledné UI

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.6 VRED

Třetím představeným programem od giganta na poli 3D renderingu, společnosti Autodesk je VRED. Software nejvíce využíváný v automobilovém průmyslu pro 3D vizualizace a virtuální prototypování pro konstruktéry. Další jeho velice silnou stránkou je snadno použitelná infrastruktura pro zobrazení ve virtuální realitě. Takže je možné zobrazit a zkoumat vizuálně přesný model v reálném měřítku. To je neuvěřitelně silný nástroj, pokud chceme prezentovat např. design automobilu. Jak lépe tuto informaci předat, než skrz kompletní interaktivní prohlídku ve virtuální realitě. 3D vizualizační software VRED pomáhá inženýrům a konstruktérům vytvářet prezentace výrobků, recenze návrhů a virtuální prototypy pomocí interaktivního GPU raytracingu a lokálního i cloudového režimu vykreslování. (Autodesk Inc. 2023)



Obrázek 6 Render automobilu v softwaru VRED

Zdroj: vlastní zpracování

VRED je k dispozici pro operační systémy Windows a s omezenou funkcionalitou na Linux. Aktuální verze softwaru nese označení VRED 2023. K dostání jsou dostupné dvě hlavní verze, VRED Professional, který slouží ke kompletní vizualizaci a tvorbě a VRED Design, který má omezenou funkcionalitu tvorby a je spíše využíván k prohlížení. Software je možné koupit pouze na určité časové období. (Autodesk Inc. 2023)

Tabulka 9 Cena předplatného VRED

Časové období	1 měsíc	1 rok	3 roky
VRED Professional	41 040 Kč	331 556 Kč	945 018 Kč
VRED Design	10 106 Kč	80 838 Kč	230 341 Kč

Zdroj: Autodesk Inc. 2023

Jak je možné pozorovat v tabulce číslo 9, tak je software opravdu drahý. Důvodem je, že VRED je zaměřený na velice specifické odvětví a funkcemi i finálními vizualizacemi se staví na úplný high-end spektra.

Tabulka 10 Výhody a nevýhody aplikace VRED

Výhody	Nevýhody
Podpora a integrace virtuální reality	Vysoká cena
High-end vizualizace	Specifické zaměření
Výukový tutoriál	Výpočetní náročnost
Vizualizace v reálném čase	Mimo dosah běžného uživatele

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.7 Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D je 3D modelovací software, který byl vytvořen společností McNeel & Associates. Společnost McNeel & Associates byla založena v roce 1980 a zaměřovala se na vývoj a prodej softwaru pro inženýrství, design a architekturu. První plná verze softwaru Rhino byla vydána v roce 1998 a od té doby se stala jednou z velice populárních aplikací pro 3D modelování na trhu. Od svého vydání byl software Rhinoceros 3D neustále vylepšován a rozšiřován o nové funkce a nástroje. V současné době je k dispozici nejnovější verze softwaru Rhino 7, která přidává nové nástroje pro tvorbu ploch a křivek a zlepšuje práci s objemovými tvary. Verze Rhino 7 také obsahuje nové nástroje pro práci s texturami a materiály a zlepšuje výkon a stabilitu aplikace. (Robert McNeel & Associates 2023)

Rhinoceros 3D je používán pro širokou škálu účelů, včetně architektury, inženýrství a dalších odvětví. Je velmi flexibilní a umožňuje uživatelům modelovat téměř jakýkoliv tvar nebo konstrukci pomocí křivek. V architektonickém odvětví se často používá pro navrhování a modelování budov a prostor. Ve výrobním průmyslu se využívá pro navrhování a modelování výrobních zařízení, strojů a dalších produktů. Vedle těchto hlavních oblastí se Rhino 3D používá pro širokou škálu vedlejších účelů. Je populární například mezi šperkaři, pro možnosti velice přesné tvorby a následné vizualizace šperků. (Sawant 2021)



Obrázek 7 Render prstenu v softwaru Rhinoceros 3D  
Zdroj: Shynia 2023

Rhinoceros 3D je k dispozici pro operační systémy Windows a MacOS. Aktuální verze softwaru nese označení Rhino 7. K dostání je s doživotní licencí na aktuálně zakoupenou verzi. Pokud dojde k vypuštění nové verze, tak je nutné si vylepšení na novou verzi zaplatit. K dispozici je také studentská/učitelská verze za přibližně čtvrtinovou cenu. Platí však, že je také doživotní, třeba i po dokončení studia. (Robert McNeel & Associates 2023)

*Tabulka 11 Cena předplatného Rhinoceros 3D*

<b>Nová trvalá licence</b>	<b>Vylepšení ze starší verze</b>	<b>Studentská trvalá licence</b>
22 080 Kč	14 400 Kč	5711 Kč

Zdroj: Robert McNeel & Associates 2023

*Tabulka 12 Výhody a nevýhody aplikace Rhinoceros 3D*

<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Doživotní licence	Omezenější tvorba komplexních 3D
Kompatibilita	Náročnější na naučení
Uživatelská přívětivost	Skriptování

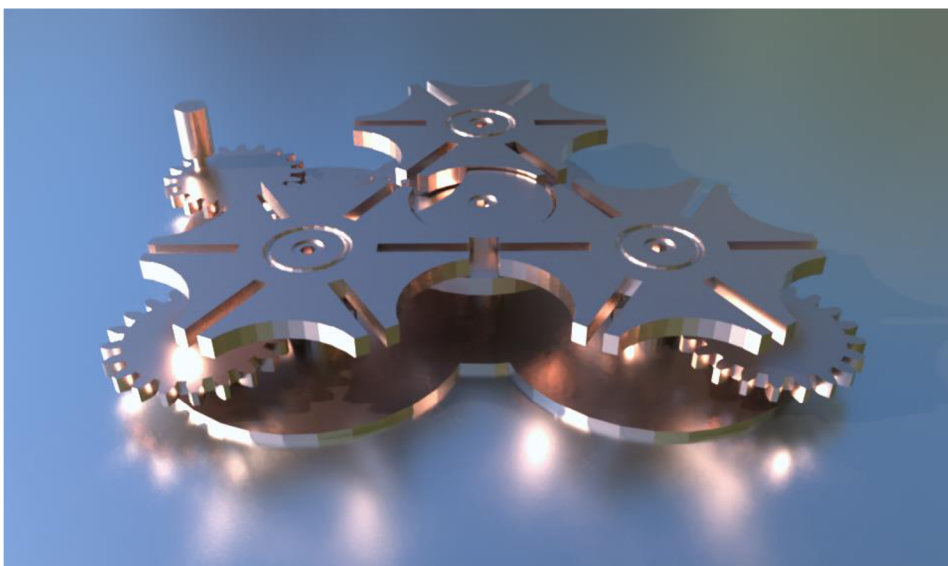
Zdroj: vlastní zpracování

## 1.8 SelfCAD

SelfCAD je poměrně nový software, který byl poprvé vydán v roce 2015. Software byl vyvinut týmem inženýrů a designérů, kteří chtěli vytvořit software pro 3D modelování, který by se snadno používal a byl přístupný všem bez ohledu na úroveň jejich znalostí. První verze SelfCADu byla základním programem pro 3D modelování, který obsahoval několik základních nástrojů pro vytváření jednoduchých tvarů a modelů. V průběhu let prošel software několika významnými aktualizacemi a vylepšeními. Byly zahrnuty pokročilejší nástroje pro modelování, například nástroje pro parametrické modelování a sochařství. Následně byl do softwaru přidán vestavěný slicer, který uživatelům umožnil připravit modely pro 3D tisk bez nutnosti použití dalšího softwaru. V roce 2018 přidal SelfCAD nový animační systém, který uživatelům umožnil vytvářet jednoduché animace pro jejich modely, a také přidal vestavěný 3D renderovací engine, který lze použít k vytváření fotorealistických obrázků modelů. (Crossbrowser 3D LLC 2023)

Díky podpoře celého procesu 3D tvorby a velice nízké ceně je tento software skvělým startovacím bodem pro začátečníky. A univerzálnost se v určitých případech hodí více než jediná silná stránka. Postupně se stává volbou i pro některé profesionály díky svému uživatelsky přívětivému rozhraní, výkonným možnostem a integraci s dalším softwarem. (Anmolmaker 2021)





*Obrázek 8 Render soukolí ze softwaru SelfCAD*

Zdroj: Crossbrowser 3D LLC 2023

SelfCAD je k dispozici pro operační systémy Windows a MacOS. Plnou podporu má také online ve webovém prohlížeči. Aktuální verze softwaru nese označení SelfCAD 1.43.0. K dostání je zadarmo s omezenou funkcionalitou, s plnou funkcionalitou s měsíčním či ročním předplatným, a navíc je možné si zakoupit i doživotní licenci. (Crossbrowser 3D LLC 2023)

*Tabulka 13 Cena předplatného SelfCAD*

<b>1 měsíc</b>	<b>1 rok</b>	<b>Doživotní licence</b>
334 Kč	3125 Kč	13 400 Kč

Zdroj: Crossbrowser 3D LLC 2023

*Tabulka 14 Výhody a nevýhody aplikace SelfCAD*

<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Cena	Málo známý/není to standart
Podpora komunity a tutoriály	Málo pluginů
Rozsah nástrojů	Pro linux pouze v prohlížeči

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.9 VRUT

Aplikace VRUT začala vznikat v roce 2007 v rámci spolupráce katedry počítačové grafiky a interakce ČVUT FEL a společností Škoda Auto a.s. Název VRUT je zkratkou z anglického slovního spojení *Virtual Reality Universal Toolkit*. To také odpovídá tomu, co aplikace nabízí. VRUT je univerzálním a flexibilním nástrojem pro práci s grafickými daty a 3D objekty. V počátku nabízel pouze základní funkce pro využívání 3D dat. V dalších letech byl VRUT neustále rozvíjen dle nároků odborných oblastí. (Kopecká 2022)

V roce 2010 dochází k nasazení do CAVE v rámci studia virtuální reality. V té době na trhu nebylo možné najít software, který by dokázal splnit požadavky Škoda Auto a.s. na prezentace ve virtuální realitě. Důležitý milník poté představuje rok 2014, kdy je přidána podpora technologie Ray tracingu. Ta umožňuje vytvářet fyzikálně korektní rendery a virtuální prezentace. V roce 2016 poté dochází k velkému rozmachu levných virtuálních brýlí. A také startu jejich využití i mimo specializovaná VR oddělení. S tím se také VRUT dostává na počítače v rámci celé společnosti. (Kopecká 2022)

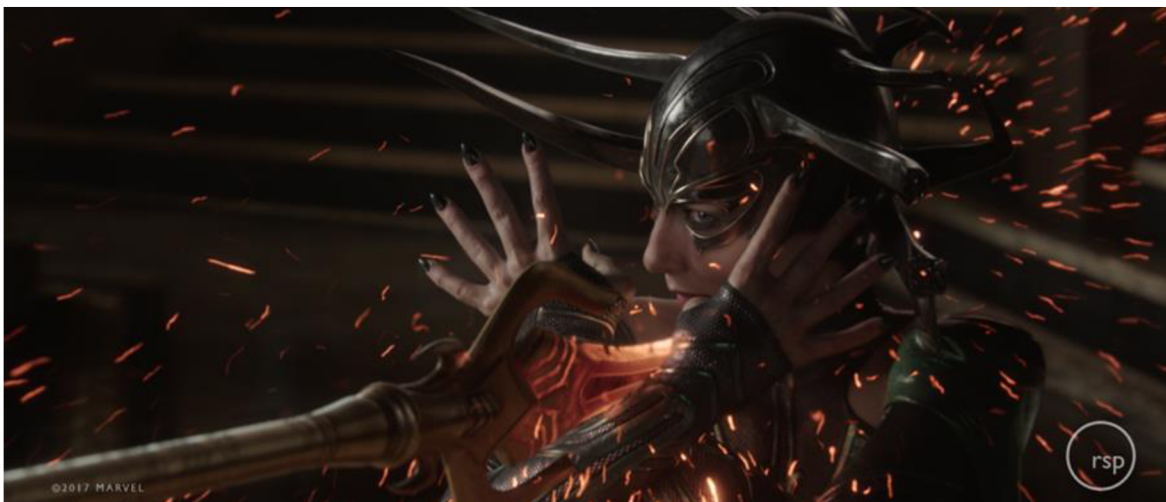
Nejvýznamnější technologický skok přichází v roce 2019, kdy se přešlo na novou verzi softwaru VRUT 2.0. Tato verze přinesla kompletně přepracované uživatelské rozhraní s jedinečnými prvky, fyzikálně založenou definici materiálů, možnost vykreslování pomocí renderovacího enginu Vulcan a modul virtuální tréninky. VRUT 2.0 v současné době představuje silný a unikátní nástroj, který podporuje rozsáhlé množství formátů dat, dokáže využít výpočetní centrum, podporuje jízdní simulátor i zobrazení ve virtuálních brýlích a umožňuje vytvářet tréninky pro zaškolení nových zaměstnanců ve virtuální realitě. (Kopecká 2022)

VRUT není možné běžně zakoupit a jeho využití je limitované pouze na společnost Škoda Auto a.s. a její partnery, kteří na vývoji aplikace spolupracují.

## 1.10 Arnold

Arnold je fotorealistický renderovací engine s globální iluminací, který vyvinula společnost Solid Angle. V roce 2016 následně Solid Angle odkupuje společnost Autodesk. Arnold patřil mezi engine, které veškeré výpočetní operace počítají pomocí hlavní výpočetní jednotky (CPU). Roku 2019 ale přišla aktualizace přinářející podporu výpočtů i na grafickém procesoru (GPU), tudíž se stal hybridním renderovacím enginem. Vzhledem k přímému zaměření enginu na fotorealismus podporuje pouze un-biased renderování. To znamená, že si při výpočtu scény nepomůže žádnými aproximačními algoritmy, ale opravdu počítá všechny paprsky a odrazy ve scéně. (Autodesk Inc. 2023)

Jednou z klíčových vlastností enginu Arnold je jeho schopnost zpracovávat velmi rozsáhlé datové sady a komplexní osvětlení. Arnold má také širokou škálu vestavěných shaderů a podporuje shadery třetích stran, což umožňuje vysokou míru flexibility vzhledu vykreslovaných materiálů. Celkově disponuje obrovskou nabídkou nástrojů a funkcí. Díky tomu je oblíbenou volbou v oblasti filmové produkce a speciálních vizuálních efektů. Arnold je velice populární u velkých filmových společností a byl využit při tvorbě spousty velkorozpočtových animovaných i hraných filmů, např. Alenka v říši divů (2010), nebo většinu filmů od společnosti Marvel, jako například Strážci galaxie nebo Thor. (Clisham 2022)



Obrázek 9 Render z filmu Thor: Ragnarok pomocí enginu Arnold

Zdroj: Rising sun pictures 2023

Vzhledem k náročnosti výpočtů je Arnold převážně využíván velkými grafickými studii s přístupem k výpočetním clusterům nebo velkému počtu výpočetních stanic, na něž je vysoce optimalizován. To umožňuje snadné rozdělení renderovacích úloh mezi více strojů. Kvůli vysokému zaměření na filmové odvětví je Arnold často využíván v kombinaci s programem Maya, kterou také vlastní společnost Autodesk. (Clisham 2022)

Arnold je dostupný pro 3D programy Maya, 3ds Max, Cinema 4D, Houdini a Katana. Engine je nutné zaplatit na určité časové období. Avšak pro 3D programy Maya a 3ds Max je Arnold dodáván zdarma s nákupem programu. (Autodesk Inc. 2023)

*Tabulka 15 Cena předplatného enginu Arnold*

1 měsíc	1 rok	3 roky
1 440 Kč	11 502 Kč	34 504 Kč

Zdroj: Autodesk Inc. 2023

*Tabulka 16 Výhody a nevýhody enginu Arnold*

Výhody	Nevýhody
Zdarma u vybraných programů	Cena
Průmyslový standart	Náročný na naučení
Hybridní renderování	Náročnost na hardware

Zdroj: vlastní zpracování

## 1.11 Corona

Corona je renderovací engine pocházející z České republiky od společnosti Chaos Czech. Původně však vznikla jako sólový studentský projekt Ondřeje Karlíka na Českém Vysokém učení Technickém v Praze v roce 2009. Postupně se ale Corona vyvinula v komerční projekt a byla založena firma Render Legion. Coroně se extrémně dařilo a pomalu začínala konkurovat enginům jako je např. V-ray. A díky tomu roce v 2017 dochází ke spojení se společností Chaos, jež V-ray vyvíjí. (Chaos Czech a.s. 2023)

Corona patří mezi enginy, které veškeré výpočetní operace počítají pomocí hlavní výpočetní jednotky. A také podporuje pouze biased renderování, takže si pomáhá aproximačními algoritmy k výpočtu paprsků. V porovnání s ostatními enginy je Corona poměrně jednoduchá na ovládání. Uživatelské rozhraní je navrženo tak, aby bylo intuitivní a snadno použitelné, díky čemuž je vhodné pro umělce, kteří začínají s 3D vykreslováním. Kromě toho má engine řadu nástrojů, které jsou navrženy tak, aby uživatelům pomohly rychle nastavit a doladit jejich scény pro vykreslování. Vzhledem k dobrým fotorealistickým výsledkům je aktuálně Corona populární v architektonickém

odvětví. Pokud jde o výkon, Corona je známá pro své rychlé vykreslovací časy a efektivní využití paměti, díky čemuž je vhodná pro použití na i jednom silném počítači nebo na renderovacích stanicích. (Easyrender 2023)



Obrázek 10 Render interiéru pomocí enginu Corona

Zdroj: Azzam 2023

Corona je dostupná pro 3D programy 3ds Max a Cinema 4D. Engine je nutné zaplatit na určité časové období, měsíční nebo roční licenci. K dostání je ve dvou verzích, Corona Solo a Corona Premium. Premium verze nabízí navíc plovoucí licenci a přístup k pár dalším softwarům od společnosti Chaos. (Chaos Czech a.s. 2023)

Tabulka 17 Cena předplatného enginu Corona

Corona Solo		Corona Premium	
1 měsíc	1 rok	1 měsíc	1 rok
1 176 Kč	7 731 Kč	1 440 Kč	10 060 Kč

Zdroj: Chaos Czech a.s. 2023

Tabulka 18 Výhody a nevýhody enginu Corona

Výhody	Nevýhody
Rychlost	Pouze CPU rendering
Uživatelská přívětivost	Pouze pro 3ds Max a Cinema 4D
Chaos rozšíření	

Zdroj: Vlastní zpracování

## 1.12 Redshift

Redshift je renderovací engine od společnosti Redshift Rendering Technologies spadající pod společnost Maxon. Řadí se mezi enginey, které výpočetní operace provádí na grafických kartách, specificky od společnosti Nvidia s CUDA procesory. To jsou výpočetní jednotky, vhodné pro kalkulaci paralelních úloh. Od verze Redshiftu 3.0.45 začaly být podporované také konkrétní grafické karty od společnosti AMD, ale pouze v zařízení Mac. Redshift převážně cílí na vysokou tvorbu snímků za co nejkratší čas, takže fotorealismus nemá tak vysokou prioritu jako výpočetní rychlost. Z toho vyplývá, že Redshift je biased renderovací engine využívající aproximačních algoritmů k zrychlení výpočtů. U těch umožňuje detailně upravovat jejich parametry, a tím pádem i míru do jaké budou využity. (Maxon Computer GmbH 2023)

Redshift je populární v oblastech filmové produkce, speciálních efektů a také animací počítačových her. Za zmínku stojí využití tohoto renderovacího enginu známým herním studiem Activision Blizzard. Ten využívá Redshift ke tvorbě animovaných scén použitých v jeho počítačových hrách jako je např. Overwatch. K tvorbě animací a speciálních efektů je potřeba mnoho nástrojů, kterými software oplývá. To umožňuje vysokou úroveň kontroly nad výsledným obrazem a zároveň dosahování požadovaných výsledků. Velká studia ocení hlavně jejich možnosti přizpůsobení pro různé projekty. (Maxon Computer GmbH 2023)



*Obrázek 11 Render ze hry Overwatch pomocí enginu Redshift*  
Zdroj: Activision Blizzard 2023

Redshift je dostupný pro 3D programy Maya, 3ds Max, Cinema 4D, Blender, Katana a Houdini. Engine je nutné zaplatit na určité časové období, buďto měsíční nebo roční licenci. (Maxon Computer GmbH 2023)

*Tabulka 19 Cena předplatného enginu Redshift*

1 měsíc	1 rok
1121 Kč	6 580 Kč

Zdroj: Maxon Computer GmbH 2023

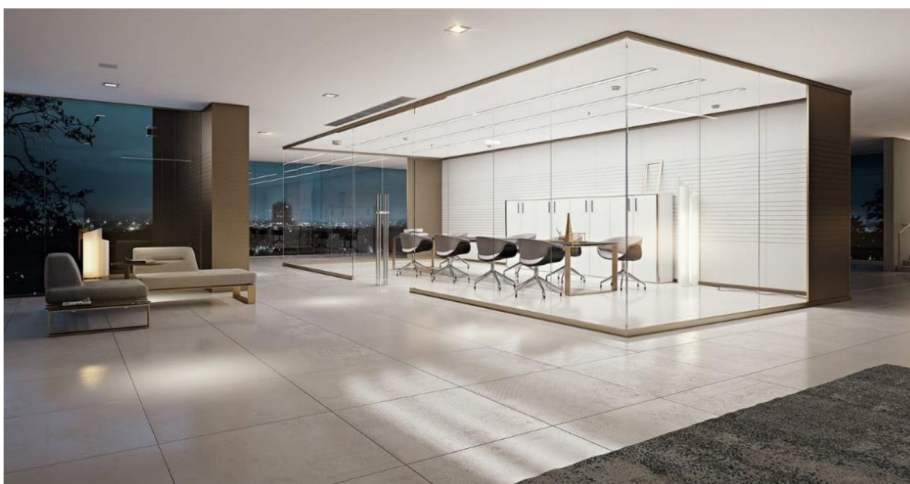
*Tabulka 20 Výhody a nevýhody enginu Redshift*

Výhody	Nevýhody
Rychlost	Pouze CPU rendering
Možnosti přizpůsobení	Pouze pro 3ds Max a Cinema 4D
Podpora spousty 3d programů	Náročnost na naučení

Zdroj: Vlastní zpracování

### 1.13 V-ray

V-ray je fotorealistický renderovací engine od Bulharské společnosti Chaos založené roku 1997. Jejich prvním produktem byl software Phoenix pro simulaci a renderování kouře a ohně. Roku 2002 přicházejí s enginem V-ray, který je dodnes jejich největší úspěch, jakožto nejvyužívanější produkt z celého portfolia aplikací. Řadí se mezi hybridní renderovací engine, takže k výpočtům scény využívá jak hlavní výpočetní jednotku, tak grafický procesor. Dále se řadí mezi biased renderovací engine, takže k výpočtům paprsků ve scéně využívá aproximační postupy ke zrychlení celkového času. Nabízí ovšem i možnost Brute-force výpočtu, tedy vynucení výpočtu opravdu všech paprsků a jejich odrazů. Což ve své podstatě dělají un-biased engine, takže uživatel dostane možnost volby, jaký způsob využít pro danou scénu. (Chaos Software EOOD 2023)



*Obrázek 12 Render interiéru pomocí enginu V-ray*

Zdroj: Vacca 2023

V-ray je populární v oblastech napříč celým spektrem, ať už se jedná o architekturu, filmovou produkci, produktovou tvorbu nebo herní průmysl. Napomáhá tomu vysoká flexibilita softwaru. Obsahuje velké množství možností, jak nastavit výpočetní parametry, spoustu shaderů včetně podpory shaderů třetích stran. Má také širokou škálu vestavěných materiálů a přístup k softwaru Chaos Scans, což je knihovna více jak 2500 naskenovaných materiálů. Všechny tyto možnosti nastavení a přizpůsobení jsou vysoce důležité pro možnosti tvorby specifických projektů z celého spektra 3D renderingu. Vychází z toho i určitá negativa, jako poměrně vysoké nároky na osvojení enginu a možnost zákazníků vybrání konkurenčního enginu s užším zaměřením. (Chaos Software EOOD 2023, Hnin 2022)

V-ray je dostupný pro 3D programy 3ds Max, Maya, SketchUp, Rhino a Revit. Ne všechny rozšíření enginu V-ray jsou vyvíjena společností Chaos, tudíž mezi verzemi pro jednotlivé 3d programy mohou být poměrně velké rozdíly. Jakožto hlavní verze, která je nejvíce vyvíjena a dostává aktualizace jako první, se považuje rozšíření pro software 3ds Max. Licence na časové období i dvě možné verze Solo a Premium se shodují s enginem Corona, který společnost Chaos také vlastní. (Chaos Software EOOD 2023)

*Tabulka 21 Cena předplatného enginu V-ray*

V-ray Solo		V-ray Premium	
1 měsíc	1 rok	1 měsíc	1 rok
1 674 Kč	10 002 Kč	2 512 Kč	15 195 Kč

Zdroj: Chaos Software EOOD 2023

*Tabulka 22 Výhody a nevýhody enginu V-ray*

Výhody	Nevýhody
Hybridní renderování	Náročnost na naučení
Možnosti přizpůsobení	Cena
Chaos rozšíření	Rozdílnost verzí pro 3d programy

Zdroj: vlastní zpracování



## 2 Klíčové faktory 3D renderingu ve vybraných odvětvích

Svět jde neustále kupředu a s tím se také vyvíjí všechny technologie. Nástroje pro 3d rendering jsou jedním z nich, postupně změnily pravidla zobrazení v mnoha odvětvích. Kromě jasných využití ve filmovém a herním průmyslu se to také stalo způsobem, jak zapůsobit na zákazníky a prezentovat jim tak své myšlenky prostřednictvím fotorealistických vizualizací. Při navštívení téměř jakéhokoliv e-shopu s vysokou pravděpodobností narazíte na vizualizaci určitého produktu, případně na jeho zasazení do virtuálního prostředí. Každé odvětví však využívá různých aspektů a možností, které jim 3d rendering nabízí. Někdy jde fotorealistický vzhled stranou, protože potřebujeme co nejrychleji renderovat. Některá odvětví pracují s jediným velice detailním modelem a některá s obrovskou scénou s vysokým počtem modelů, kde by jejich detailnost byla ke škodě. V následující kapitole budou představeny různá odvětví a příklady, jak renderování využívají v praxi. Také zde budou popsány klíčové faktory, které 3D rendering ovlivňují a jejich důležitost pro rozdílná odvětví.

### 2.1 Filmová tvorba

Jakožto nejlepší příklad toho, kdy se v každodenním životě můžeme setkat s 3D renderingem je filmový a televizní průmysl. Drtivá většina moderních filmů totiž využívá počítačově generovaných obrázků a speciálních filmových efektů. Do této kategorie také patří seriály, televizní noviny nebo reklamy, které pravidelně vidáme na televizních obrazovkách. Největším důvodem oblíbenosti renderování je cenová efektivita. Tvůrci viděli, že filmový požitek lze divákům ukázat i bez výstavby filmových kulis, které jsou drahé a také vyžadují spoustu času na stavbu a údržbu. Produkční společnosti uviděly příležitost, jak utratit méně a vydělat více. Vzhledem k tomu, že i diváky speciální efekty a vizualizace velice bavily, bylo jasné, že se využití 3d renderingu stane normou. Dalším významným důvodem byla rostoucí popularita sci-fi a fantasy příběhů. Ty ve skutečném světě neexistují, takže využití 3d renderingu byla jasná odpověď. Toto vše vedlo i k větší tvůrčí svobodě režisérů a filmařů. Myšlenky a nápady je nyní mnohem jednodušší převést na filmové plátno, což zas umožnilo růst filmového průmyslu a vývoji nových metod a technologií. Při snaze vytvořit vizuální efekty, na které by bylo nutné vynaložit velké množství prostředků, přišel 3d rendering jako levná a vysoce efektivní alternativa. A tím si vydobyl veškerou popularitu jak mezi diváky, tak mezi produkčními společnostmi. (Saha 2022)

Nové filmy musí být tvořeny s předpřipraveným plánem, jak budou vizualizace integrovány do natočených materiálů. Nejčastěji je pro tyto účely využíváno zelené plátno, které je umístěné v pozadí záběru. V postprodukcí následně grafici nahradí zelené pozadí čímkoliv chtějí. Plátno může zabírat celé pozadí, nebo jen jeho část, podle toho, kolik scény budeme počítačově dodělávat. V zelené barvě jsou také pomocné rekvizity pro natáčení scén, kdy je nutné počítačově přidat objekt, se kterým herec přímo interaguje. Do této kategorie lze zařadit i obleky pro snímání pohybu. Herec při natáčení pracuje s kolegou, který tam fyzicky je, takže je možné scénu mnohem lépe natočit. A na data získaná z obleku lze pak již počítačově dodělat jakoukoliv virtuální postavu. Někdy je do scén renderováno pouze pár efektů a také záleží na druhu filmu. Ale čím dál častěji jsou speciální efekty a 3d rendering tím hlavním, na čem je celý videosnímek vybudován. A existují určité aspekty, které filmům dokážou také škodit. Například když se produkce spoléhá, že veškeré problémy, které se vyskytnou, během natáčení vyřeší 3D rendering. A když scéna není úplně vhodně natočena, tak počítačově přidávané prvky mohou působit divně a nereálně, že tam prostě nepatří. Produkce často plánuje přidávání těchto prvků až v postprodukcí, aniž by měly představu o tom, co chtějí přidat během natáčení. A i když je 3d rendering mocný nástroj, tak bez pořádné přípravy výsledný produkt nemusí vypadat úplně nejlépe. (Baker 2022)



Obrázek 13 Fotka z natáčení filmu Avangers se zeleným plátnem a oblekem pro snímání pohybu  
Zdroj: Baker 2022

S rostoucí komplexností scén, které jsou tvořeny za pomoci počítačem generovaných obrázků a také stále se zvyšujícími nároky diváků na kvalitu a fotorealismus roste i náročnost projektů na produkci. Některé projekty sice mohou být realizované malým týmem 3D specialistů, za velkorozpočtovými filmy ale stojí obrovské týmy stovek 3D specialistů, které na snímku pracují

měsíce, klidně však i roky. Filmové štáby jsou tedy častěji a častěji tvořeny více jak z poloviny těmito specialisty, kteří v postprodukcí pomocí 3d renderingu a speciálních efektů finalizují konečný snímek. Budoucnost je tedy uvnitř studia a za počítačem. Ne vždy je k dispozici takový rozpočet, aby bylo možné scény natáčet bez využití speciálních efektů. Studia se snaží být přirozeně co nejefektivnější. S tím se zdokonalují technologie a pomalu přichází nástupce zelených pláten. Virtuální kulisy, které plátno nahrazují LED obrazovkami promítající fotorealistické pozadí v reálném čase. Což znamená, že se dočkáme zas lépe vypadajících virtuálních efektů a renderů než doteď. (Baker 2022)

## 2.2 Počítačové hry

Tvorbu počítačových her lze považovat za počátek rozvoje počítačové grafiky a renderingu. Existuje mnoho aspektů, proč jsou počítačové hry každodenní součástí života čím dál tím více lidí. Hry nabízí skvělé příběhy, zajímavou hratelnost a zvukový doprovod. Ale je tu aspekt, který se od počátku vyvíjel nejvíce a také ho maximálně vnímáme – vizuální stránka hry. Od počátku vzniku videoher jsou hráči přitahováni ke hrám, které jsou nejen zábavné, ale také úžasně vypadají. Ze začátku byla grafická stránka her pouze jednoduchá 2D grafika. S postupem času se začalo zlepšovat rozlišení a z dvou barev se díky lepší barevné hloubce stalo mnohem více. Největší skok však přišel při přesunu do trojrozměrného prostoru, což je bráno jako jeden z největších pokroků počítačem generovaného obrazu v herním průmyslu. Díky 3D prostoru je možné se mnohem lépe ponořit do herního zážitku. Každý rok pro herní průmysl znamená technologický pokrok a zdokonalení. (Garland 2019)

Využití renderingu se však u počítačových her podstatně liší v porovnání například s filmovým průmyslem. Důvodem je, že hry jsou postaveny na přímé interakci s uživatelem a neprodlené odezvě. Vizuální stránka hry musí v reálném čase reagovat na veškeré podněty a grafický procesor to vše musí zvládat počítat. V případě renderování neinteraktivní scény na čase vyhotovení tolik nezáleží. Jeden snímek může být renderován v rámci několika minut až hodin v závislosti na náročnosti scény a výpočetním výkonu. (Hagberg 2022)

U počítačových her je potřeba v minimálním základu zobrazovat 30, lépe však 60 a více snímků za vteřinu. A to z důvodu plynulosti zobrazení, protože 24 snímků za vteřinu je přibližně nejnižší hodnota, aby pohyb působil plynule, pokud na něj koukáme. Při interakci s obrazem jsme však schopni rozlišit i mnohem větší počet snímků za vteřinu. (Wiltshire 2022)

Z tohoto důvodu vyplývá celkově nižší grafická stránka počítačových her ve srovnání s ostatními odvětvími. Vzhledem k počtu vykreslení nemohou být hry tak detailní. S potřebným výpočetním výkonem je nutné nakládat co nejlépe. Prostředky jakožto modely nebo textury se používají opakovaně, jelikož vykreslení stejných objektů na několika pozicích je rychlejší, než kdyby vše bylo jedinečné. Modely neobsahují tolik polygonů a k navození dojmu detailních modelů se využívají různé méně výpočetně náročné techniky jako např. bump mapping. Zatímco filmové speciální efekty a produktové vizualizace mohou být tak fotorealistické, že je nejsme schopni rozeznat od reality, tak videohry tohoto stupně realismu ještě nedosáhly. Každým rokem se však tato mezera zmenšuje a pravidelně vydávané aplikace zaměřené na fotorealistické interaktivní scény renderované v reálném čase předpovídají, že během několika dalších let může být rozdíl téměř nepatrný. (Allgaier 2014)

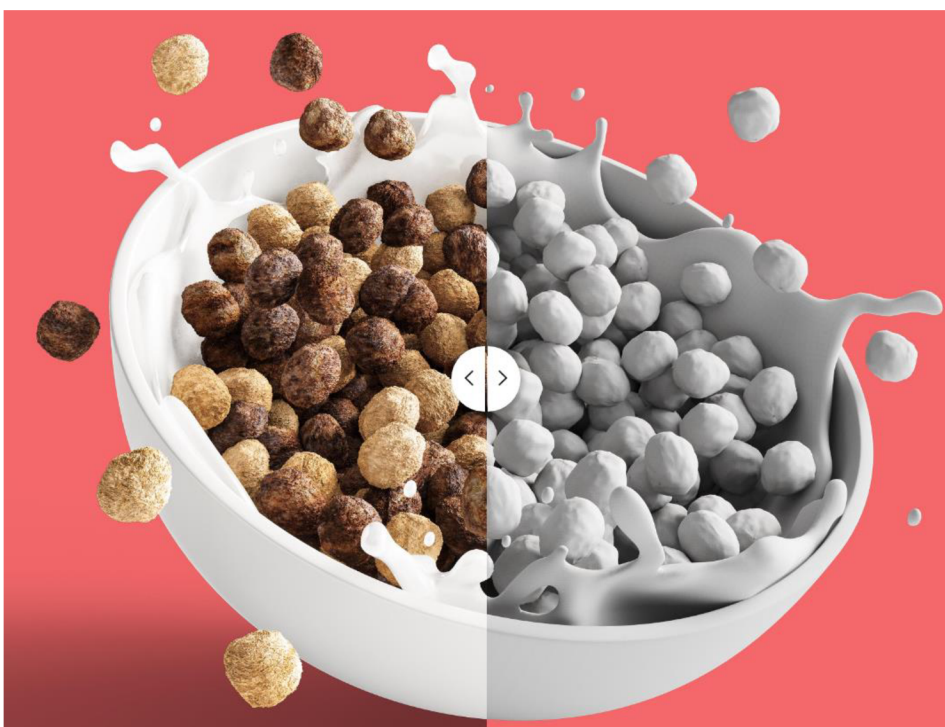
Počítačové hry také zpopularizovali využití virtuální reality. Načež se ukázalo, že její využití není pouze ve videoherním průmyslu, ale může být efektivně využito i v jiných odvětvích. Virtuální realita je vnímána jako jedna z hlavních cest, jakou se budou počítačové hry do budoucna ubírat. Konceptuálně je ponoření se do virtuálního světa atraktivnější než pozorování ploché obrazovky. Ať už se jedná o herní zážitek, nebo prohlídku nemovitosti. Fotorealismus ve virtuální realitě je však ještě vzdálenější, jak u videoher. Nároky na výkon jsou totiž ještě několikrát vyšší vzhledem k tomu, že pro každé oko je obraz renderovaný zvlášť. K tomu se připojuje velice vysoké rozlišení, obnovovací frekvence a potřeba stabilních vysokých snímků za vteřinu. (Grahavr 2022)

## **2.3 Produktová vizualizace**

Od počátků novodobé reklamy se k prezentaci a propagaci spotřebního zboží používaly vizuální prvky jako ručně kreslené obrázky a fotografie. S pokrokem technologie bylo ruční kreslení nahrazeno fotografováním, protože se stalo rychlejším a cenově výhodnějším. A historie se opakuje, jelikož produktové fotografie začínají být nahrazovány rendery. Ve svých počátcích nebyl 3D rendering schopný vytvářet realistické vizualizace kvůli nedostatečně pokročilým technologiím. Dnes je však technologie 3D vizualizace tak pokročilá, že produkuje fotorealistické snímky, které jsou skoro moc dobré na to, aby byly skutečné. (Melino 2023)

Spousta společností se nyní začíná rozhodovat pro počítačově vygenerované vizualizace oproti produktovým fotografiím, aby zachytily klíčové vlastnosti svých produktů. A produktová vizualizace nabízí oproti tradiční produktové fotografii mnoho výhod. Kromě nerozeznatelnosti od

reálného produktu může být vizualizace levnější a rychlejší než produktové focení. Pokud se klientovy něco nelíbí, tak je možné vizualizaci do nekonečna upravovat. A to bez nutnosti řešení přepravy produktu, pronájmu a nastavení studia nebo třeba osvětlení. Během vizualizace není tak nákladné udělat chyby, protože se oproti reálnému focení velice jednoduše opravují. Další výhodou je celková univerzálnost. Produkt můžeme umístit do jakéhokoliv prostředí, určit si jakoukoliv vzdálenost např. pro detail zblízka pod libovolným množstvím úhlů, což je u fotografie téměř nemožné. Změnou barvy nebo materiálu je možné pomocí pár kliknutí jednoduše měnit celkové variace produktu. A to vše je možné spojit také do tvorby animací a produktových videí. Vizualizace produktu navíc není spoutána nutností existence fyzické podoby výrobku. V konceptuální fázi vývoje je tak možné produkt pozorovat tak, jako by existoval, velice rychle provádět změny a zkusit různorodé konfigurace. (Melino 2023)



*Obrázek 14 Produktová vizualizace cereálií před a po nanesení textur*  
Zdroj: MG Design UK 2020

Nejlépe se pomocí 3D renderingu fotorealisticky napodobují takové objekty, které byly nějakým způsobem vytvořeny člověkem. Z toho důvodu lze vyvodit, že právě výrobky, se kterými se setkáváme na denní bázi, jsou skvělým cílem produktové vizualizace. Výrobci mobilních telefonů a spotřební elektroniky využívají převážně počítačových vizualizací k představení svého produktu v produktových prezentacích a reklamních videích. Potravinářské společnosti využívají fotorealistické vizualizace jídel k tvorbě reklam, protože je možné potravinám přidat ještě lepší vzhled ve srovnání se skutečností. Velice populární je tento přístup také u společností vyrábějící

nábytek a celkově vybavení bytu. Vizualizace jsou znovu využívány v reklamních spotech, ale také v e-shopech k představení produktu v jeho možných variacích. Dále pak tyto společnosti využívají mobilních aplikací pro rozšířenou realitu, díky čemuž je možné prerenderovaný model virtuálně umístit do reálného světa. Zákazník si tak může vyzkoušet, jestli se mu produkt do bytu např. rozměrově vejde, nebo designově hodí. Díky vývoji a zdokonalování nových technologií, jako jsou například nástroje pro 3D skenování, je možné převést reálný objekt do virtuální podoby. A také neustále rostoucí výpočetní výkon za nižší náklady umožňuje využití produktové vizualizace pro stále větší portfolio produktů. Je možné vytvářet realistické a atraktivní prezentace, které přitahují pozornost zákazníků a zvyšují zájem o produkty. Navíc umožňují jednodušší a rychlejší způsob aktualizací a úprav, což je pro výrobce a prodejce velkou výhodou. Lze předpokládat, že v budoucnu bude produktová vizualizace využívána pro prezentace téměř všech produktů. (CGIFurniture 2021)

### **2.3.1 Automobilový průmysl**

Pod produktovou vizualizaci patří také automobilový průmysl, jehož nedílnou součástí jsou počítačově generované obrázky. Díky možnostem nejmodernějších technologií lze považovat automotive za průkopníka, který produkuje jedny z nejdetailejších a nejrealističtějších renderů. Paradoxně jsou nejlepší ty rendery, u kterých si ani nelze všimnout, že se o render jedná. A tyto případy lze v moderní době pozorovat na automobilech viditelných v reklamách a na internetu denně. Pořizování fotografických snímků nových vozů a jejich variací je zdlouhavé, časově náročné a hlavně drahé. Rendering nabízí úžasné snímky při výrazně zredukovaných zmíněných nevýhodách. Přináší jednodušší způsob, jak naplnit webové stránky prodejců působivými snímky, které vyobrazují vůz v naprostém detailu. Oproti běžným fotografiím poskytuje rendering vysokou flexibilitu. Automobil lze umístit do libovolné lokality, zachytit pod libovolným úhlem za jakéhokoliv osvětlení, vše podle přání klienta. Při změně výbavy automobilu není nutné pořizovat nové snímky, stačí aktualizovat model. Na rozdíl od klasického videa lze do renderů přidávat jedinečná pozadí a vytvářet libovolné animace vozidla velice efektivně.

## 2.4 Architektonická vizualizace

Další oblastí, kterou možnosti fotorealistických renderů naprosto změnilo je architektura. Fotografie, ručně kreslené výkresy a návrhy, to vše je v dnešní době minulostí, kterou z drtivé části nahradila právě počítačově generovaná architektonická vizualizace. Lidé do projektu zainvestují pouze tehdy, pokud budou mít pocit, že je projektový plán dobře udělaný a splňuje jejich požadavky. Pomocí vizualizace je možné jasně vysvětlit, jak bude jejich budoucí domov vypadat a také nastínit vše důležité co se projektu týče. Dříve se mohlo stát, že se po dokončení stavby domu objevily určité nedostatky, jejichž odstranění stálo další finanční prostředky. Pokud je však k dispozici kompletní vizualizace projektu, tak je tyto konstrukční nedostatky snadné odhalit a opravit ještě v procesu projektu před výstavbou. Zároveň je možné bez větších problémů provádět změny v návrhu dle přání klienta těsně před zahájením výstavby. (Mitchell 2020)

Velice důležitý aspekt každé stavby je světlo, které se dříve nemohlo tak dobře prezentovat vzhledem k nedostatečným nástrojům pro jeho simulaci. Nyní lze pomocí vizualizací ukázat průchod slunečních paprsků v libovolný čas, roční období i geografické položení díky možnosti simulace slunce. Lze také určit noční osvětlení a světelný ruch díky možnostem, jako umístění pouličních lamp do vnějšího virtuálního prostoru kolem objektu. Designéři zas využívají možnosti simulace světla k naplánování rozložení nábytku v domě tak, aby bylo dostatek světla z oken a z osvětlení umístěného v bytě. (Mitchell 2020)



*Obrázek 15 Architektonická vizualizace*

Zdroj: Mitchell 2020

Díky fotorealistickým renderům měli klienti naprosto jasnou představu, jak bude jejich budoucí nemovitost vypadat. S postupem času však 3D vizualizace zevšedněly a klienti potřebovali něco působivějšího s větší vypovídající hodnotou. Dalším logickým krokem po generovaných obrázcích byla videa a později propojení s virtuální realitou. Využití těchto metod v architektuře přispělo tomuto odvětví mnohem více, než by se na první pohled mohlo zdát. Vytvořená animace dokáže vypadat stejně působivě, jako profesionály natočené video. To je pro architekty, kteří představují své návrhy zásadní. Potřebují totiž prezentovat svůj návrh co nejpřitažlivějším způsobem. A animace není jen fotorealistická, ale také využívá stejných technik jako stříh videa. Společně s vhodným zvukovým doprovodem a vyprávěním dokáže tato forma prezentace zanechat v klientovy trvalý dojem. Takto vytvořené video má vysokou míru pohlčení, kterou dokáže překonat už jen plně interaktivní prohlídka ve virtuální realitě. Každá metoda však dokáže klientům nabídnout pocit podobný tomu, jako kdyby byli na fyzické návštěvě nemovitosti i přesto, že se jedná o návrh. Každý prodejní bod může být ve vizualizaci zdůrazněn. A propojení vymodelovaného interiéru i exteriéru dodá prezentaci projektu celistvost. Z těchto nástrojů však v architektuře netěží pouze architekti, ale využívají jich všechny profese související s architekturou. Animace a videa mají převážně dvojí využití, jako prezentační nástroj a také marketingový nástroj. Animovaná marketingová videa jsou v realitním byznysu čím dál tím více aplikovány v propagačních kampaních. Jejich využití můžeme pozorovat v televizních reklamách, na webových stránkách i na sociálních sítích. Množství, v jakém jsou 3D vizualizace využívány v architektuře je srovnatelné např. s filmovou produkcí. A díky neustálému vývoji nástrojů a relativně přijatelné náročnosti na vybavení se bude toto množství v oboru neustále zvyšovat. (Paul 2022)

## 2.5 Klíčové faktory

Každé odvětví je odlišné a má jiné nároky na výslednou vizualizaci a proces její tvorby. To ovlivňuje, na jaké klíčové faktory se odvětví zaměřuje a považuje za důležité. Zatímco ve filmovém průmyslu je nejdůležitější vizuální stránka, tak v herním průmyslu jde hlavně o optimalizaci náročnosti a čas. A některá odvětví hledají zlatý střed mezi těmito parametry. V této podkapitole budou jednotlivé faktory představeny vzhledem k jejich významu v procesu 3D renderingu. Obecně však platí, že jsou spolu tyto faktory úzce propojeny a vzájemně se ovlivňují.



### 2.5.1 Snímková frekvence

Jednotkou snímkové frekvence je FPS vycházející z anglického frames per second, neboli počet snímků za vteřinu. Ovlivňuje, jak bude obraz na diváka působit. Obraz se snímkovou frekvencí kolem 15 FPS bude vnímán jako trhaný. Ve filmovém průmyslu se běžně využívá 24 FPS, což pro diváka působí už jako plynulý obraz. Vyšší frekvence je využívána např. ve videoherním průmyslu, kdy je vykreslováno spoustu věcí najednou a vysoká snímková frekvence přidává na plynulosti. (Parker, Dhanani 2012)

V rámci 3D renderingu je tato hodnota důležitá při renderování v reálném čase. Toho je nejvíce využíváno ve videoherním průmyslu. Hráči počítačových her považují za minimální standard 60 FPS. Profesionální hráči akčních videoher preferují až 144 FPS a více. Pro herní konzole je standardem 30 FPS, vzhledem k renderování obrazu na televizi. To je výpočetně mnohem náročnější oproti klasickému monitoru. Důležitým parametrem snímkové frekvence je její stabilita, jelikož pokles FPS je velice dobře vnímatelný. Proto je u konzol voleno stabilních 30 FPS oproti 60 FPS, které by stabilní nemuseli být. V automobilovém průmyslu je snímková frekvence důležitá u fotorealistických prezentací automobilů, které běží v reálném čase. Také ve virtuální realitě, např. při virtuální prohlídce vozu. Aby se člověku neudělalo špatně a zážitek působil věrohodně, tak pro virtuální realitu se obecně doporučuje alespoň 90 FPS. (Parker, Dhanani 2012)

### 2.5.2 Render time

Každé odvětví má různé nároky na délku renderování jednoho snímku. Jak dlouho bude jeden snímek renderován, závisí také na mnoha faktorech. Herní vývojáři vše vytvářejí tak, aby to fungovalo v reálném čase. To znamená, že musí být renderovány desítky snímků za vteřinu. Existují proto přísná omezení pro složitost modelů, textur a dalších prvků. Dále je využíváno mnoha technik, aby se dosáhlo co nejlepšího výkonu. Použití agresivní úrovně detailu znamená, že když jsou objekty dostatečně daleko, tak se vykreslují pouze jejich verze s nízkým počtem trojúhelníků, nebo jsou přímo nahrazeny 2D objektem. V průběhu let nás také hry naučily nevsímat si určitých grafických nedostatků. Může se např. jednat o nedokonalé stíny, nebo doskakování vzdálených objektů. Pokud se grafika přibližuje fotorealismu, tak jen díky tomu, že engine podvádí a využívá odhadů. To vše proto, aby hra běžela co nejlépe a zároveň také dobře vypadala. Oproti tomu například filmová studia nejsou omezena limitacemi vycházejících z renderování v reálném čase. To umožňuje renderovat s realističtějším osvětlením,

podpovrchovým rozptylem, vícenásobným odražením světla nebo třeba fyzikálně korektní rendery. V potaz je také nutné brát, že výstup musí vypadat dobře i na obrovském plátně v kině a ne pouze na monitoru u počítače. S vyššími parametry prvků a větší kvalitou výstupu se velice rychle prodlužuje doba vykreslení. Render jednoho snímku poté může trvat od několika desítek minut po desítky hodin. (Zeman 2015)

Společnost Pixar, která se řadí mezi největší producenty animovaných filmů, využívá pro rendering renderovací farmu skládající se z 2000 strojů a 24 000 výpočetních jader. Přesto jim vyrenderovat film Univerzita pro příšerky z roku 2013 zabralo celé 2 roky. (Collingridge 2022)

### **2.5.3 Vizualní stránka**

Vizualní stránka renderů zcela závisí na odvětví a účelu vizualizace. Fotorealismus je styl vykreslování, který je velice žádaný a také se řadí mezi výpočetně nejnáročnější. Dá se považovat za poměrně subjektivní. Zatímco amatérovi může render připadat k nerozeznání od fotografie, tak zkušený 3D grafik může najít spoustu nedostatků. Existuje velká řada parametrů a funkcí, které fotorealismus ovlivňují. Využití technologie ray tracingu se řadí k hlavním metodám pro dosažení tohoto efektu. Tato technika umožňuje realisticky simulovat osvětlení scény vykreslením fyzikálně přesných odrazů, lomů, stínů a nepřímého osvětlení. A to tak, že zjišťujeme barvu paprsků procházejících každým pixelem obrazovky, kde tyto paprsky vznikly, kam dopadají a kde ve scéně se odrážejí. (Cardoso 2017)

Fyzikálně založené vykreslování, neboli PBR (Physically based rendering) je další využívanou metodou k dosažení fotorealismu. Staví na interakci světla s vlastnostmi materiálů na základě přímo naměřených reálných hodnot materiálů. Simuluje fyzikální jevy jako např. zachování energie, což znamená, že množství světla odraženého od povrchu nemůže být nikdy větší, jak množství světla přicházejícího. Použití těchto pravidel pomáhá objektům vypadat přirozeněji. Proces vyobrazení virtuálních materiálů se pokouší co nejvíce přiblížit k fyzikálně reálnému a přesnému stavu. (Cardoso 2017)

#### 2.5.4 Počet trojúhelníku

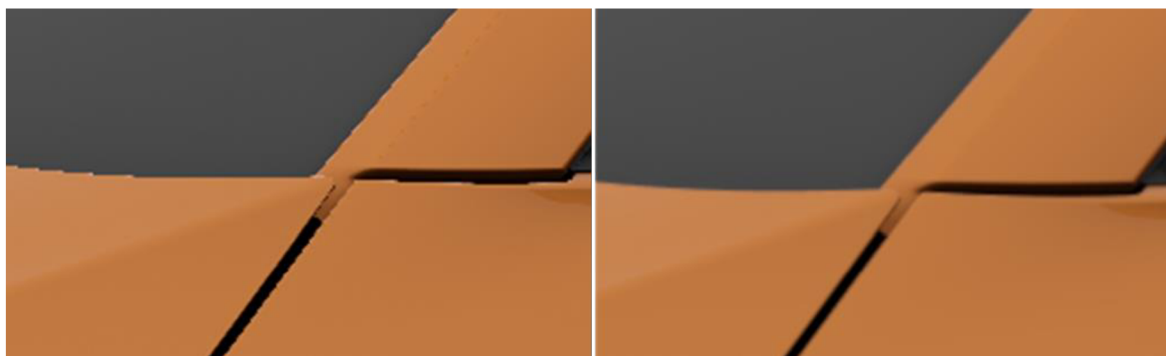
Počet trojúhelníků určuje komplexnost modelu. Čím větší je počet, tím větší je detailnost. S počtem se však také zvětšuje velikost souboru a potřebný výpočetní výkon pro zpracování modelu. Odvětví, která využívají renderingu v reálném čase, obvykle využívají modelů v rozsahu desetitisíců trojúhelníků. Detailnost poté mohou vylepšovat např. pomocí textur. Odvětví, která využívají statického renderingu, si mohou dovolit mnohem detailnější modely. Důvodem je zpravidla lepší přístup k vysokému výpočetnímu výkonu a menší prioritě délky renderování. V automobilovém průmyslu je důležitý každý detail. Je tedy běžné, že počet trojúhelníků se pro kompletní model automobilu pohybuje ve stovkách milionů. Pro výpočet takto detailních modelů ve fotorealistické kvalitě je však potřeba obrovský výpočetní výkon renderovacích farem.

#### 2.5.5 Rozlišení

Každý vykreslovaný digitální obraz má určité rozlišení skládající se z výšky a šířky obrazu. To určuje, kolik pixelů bude nutné vykreslit. Například rozlišení označované jako FULL HD, tedy 1920 x 1080 pixelů znamená, že vykreslovaný obrázek má poměr stran 16:9 a pro jeho zobrazení je nutné vykreslit 2 073 600 pixelů. Při zdvojnásobení rozlišení, tedy z FULL HD na 4K (3840 x 2160) je počet pixelů, které je potřebné vykreslit čtyřnásobné. Rozlišení má tedy velký dopad na náročnost vykreslování. A to hlavně v reálném čase, při kterém se zvětšující počet pixelů promítá do každého renderovaného snímku za vteřinu.

#### 2.5.6 Anti-aliasing a samples

Anti-aliasing (AA) je metoda, která je využívána k vyhlazení hran vykreslovaných objektů. K chybám a nerovnostem hran dochází v procesu vykreslení pomocí rasterizace, tedy převedení obrazu na jednotlivé pixely. Souřadnice vykreslovaných vrcholů mohou mít teoreticky jakoukoliv pozici, ale při vykreslování jsme omezeni rozlišením a pixely. To znamená, že je možné obarvovat pouze určité pixely v síti a objekt není možné vykreslit jedna ku jedné. Anti-aliasing má mnoho druhů. Druh a úroveň vyhlazení ovlivňuje výslednou vizuální stránku a výpočetní náročnost. Na obrázku 16 je možné pozorovat zubaté hrany při použití anti-aliasingu úrovně 1, a již vyhlazené hrany při použití anti-aliasingu úrovně 8. (Parker, Dhanani 2012)

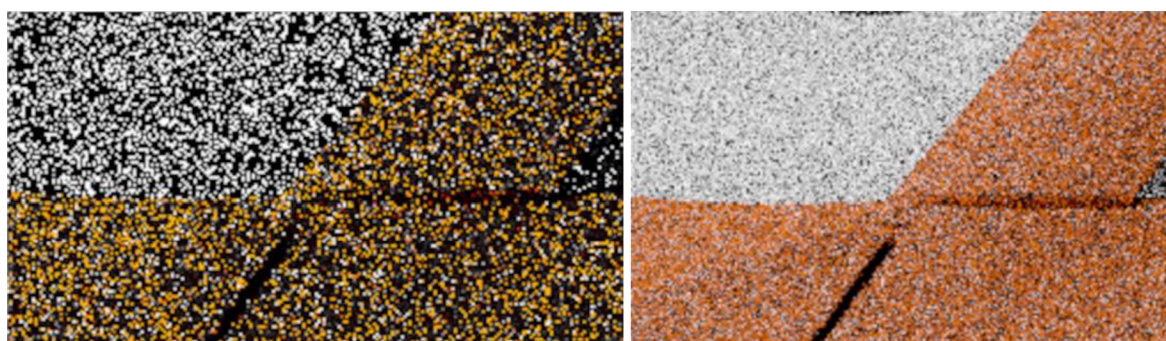


*Obrázek 16 Anti-aliasing v režimu Vulkan – vlevo anti-aliasing 1, vpravo anti-aliasing 8*

Zdroj: vlastní zpracování

Raytracing je metoda vykreslování, která nevyužívá rasterizace, ale sledování paprsků. Počet samplů určuje, kolik paprsků bude skrz každý požadovaný pixel vykreslovaného obrázku vystřeleno do scény. Čím více paprsků je pro každý pixel spočítáno, tím lepší je kvalita vyhlazování, zredukovaný šum a pixel má více odpovídající barvu. Také ale stoupá doba vykreslování a výpočetní náročnost. Právě počet samplů pro renderování v reálném čase metodou raytracingu má obrovský dopad na snímky za vteřinu. (Pharr, Humphreys 2010)

Na obrázku 17 je možné pozorovat, že při vykreslování na jednom samplu je vidět obrovský šum a velké množství pixelů je černé. To znamená, že bylo vystřeleno tak málo paprsků, že spousta pixelů má naprosto neodpovídající barvu. A obrázek vlastně ani není rozpoznatelný. Při vykreslování na hodnotě samplů osm už je možné rozpoznat některé tvary, pixely začínají mít více odpovídající barvu a šum se začíná zmenšovat.



*Obrázek 17 Samples v režimu raytracingu – vlevo samples hodnoty 1, vpravo samples hodnoty 8*

Zdroj: vlastní zpracování

Pro srovnání je obrázek 18 vykreslen při hodnotě samplů pět set. Při této hodnotě již šum téměř není vidět, veškeré pixely mají odpovídající barvu a je možné jednoznačně pozorovat tvary, které se v obrázku nachází.



*Obrázek 18 Samples v režimu raytracingu – samples hodnoty 500*  
Zdroj: vlastní zpracování

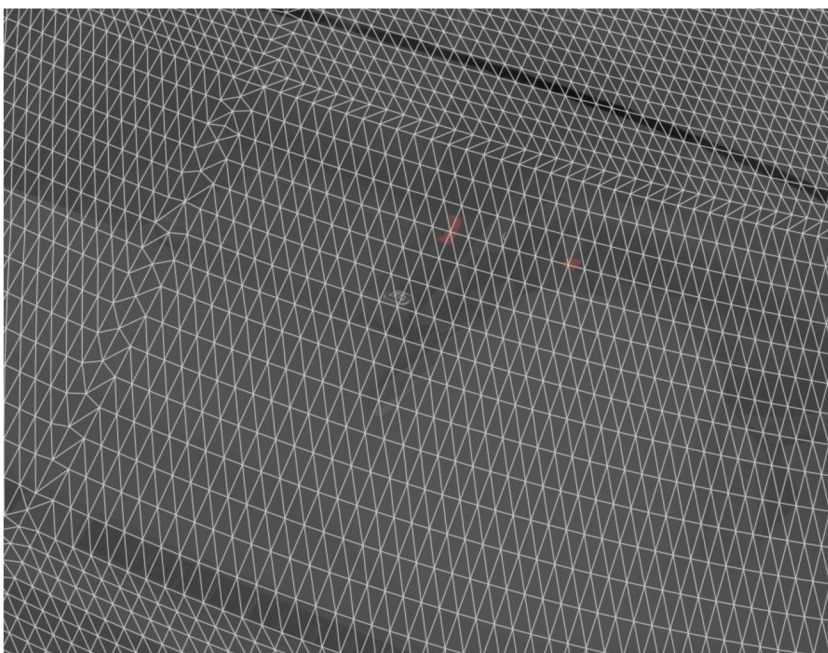
### 3 Možnosti optimalizace scény 3D renderingu

Optimalizace scény je velice důležitý proces v rámci 3D renderingu. Úroveň optimalizace ovlivňuje velký počet faktorů napříč celým procesem, který stojí za finální vizualizací. Výpočetní náročnost lze považovat za hlavní faktor, kvůli kterému optimalizaci aplikujeme. Jak dlouho potrvá vyrenderovat jeden snímek, na kolik snímků za vteřinu je možné se dostat během renderování v reálném čase, to vše ovlivňuje výpočetní náročnost. Mezi další faktory, které ovlivňuje optimalizace, ale nemusí být na první pohled zřejmé, se například řadí velikost souborů a doba načítání scény v softwaru. Na slabších zařízeních se může komplexní scéna načítat v rozmezí desítek minut. Úroveň a metody optimalizace se odvíjí od finálního výstupu. Pro zobrazení komplexního modelu v reálném čase na slabém zařízení bude využito jiných kroků ve srovnání se snížením doby renderingu architektonické vizualizace. V této kapitole jsou představeny nejrůznější metody optimalizace, které jsou nejčastěji využívány napříč odvětvími.

#### 3.1 Decimace trojúhelníků (redukce)

Čím více trojúhelníků scéna obsahuje, tím náročnější na vykreslení se stává. Vykreslování trojúhelníků zabírá prostředky paměti RAM a grafické karty, s čím se pojí pomalejší časy renderování. Decimace trojúhelníkové sítě je proces, který vede ke snížení celkového počtu trojúhelníků v síti. Optimálně při zachování celkového tvaru a vizuální stránky. Využívána je hlavně k tvorbě nízkotrojúhelníkových modelů z vysokotrojúhelníkových modelů při snaze zachování původního tvaru. Snížená složitost sítě vede k lepšímu zvládnutí aplikacemi, rychlejšímu vykreslování a vyššímu výkonu. (Botsch et al. 2010)

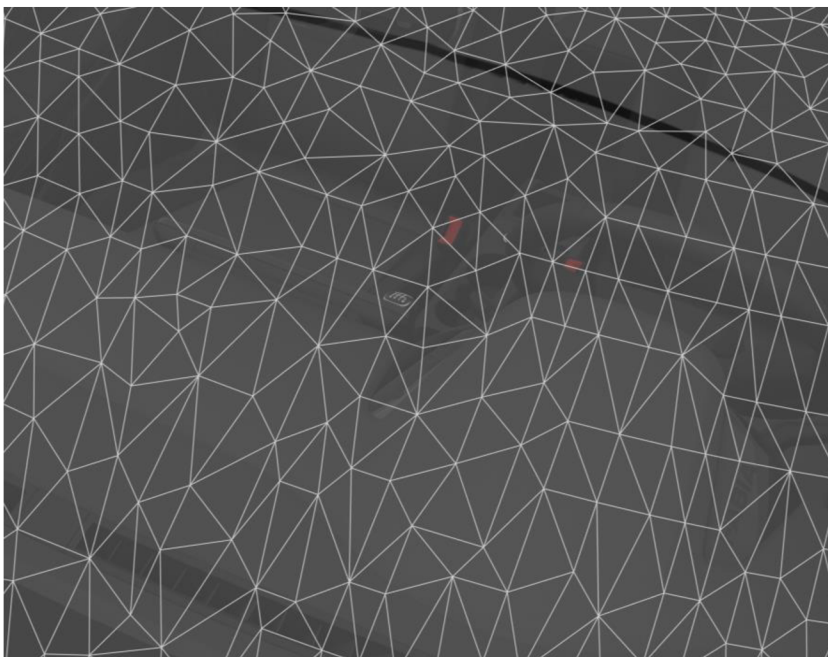
Aplikace k decimaci využívají různých algoritmů, takže kvalita a časová náročnost se v různých aplikacích může lišit. Mezi nejčastější nastavitelné parametry decimace patří procentuální hodnota, o kterou se algoritmus pokusí snížit počet trojúhelníků. Dále pak míra podobnosti, která určuje, jak moc se může objekt decimací deformovat. Odstraněním jediného trojúhelníku může teoreticky dojít k mnoha dalším topologickým změnám. Obecně se tedy algoritmy řídí odstraňováním hran od prvků s nejnižším po nejvyšší podíl na podobu. (Botsch et al. 2010)



*Obrázek 19 Trojúhelníková síť předního skla – 15 988 trojúhelníků*

Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázcích 19 a 20 je možné pozorovat vliv decimace na trojúhelníkovou síť. Jedná se o geometrii předního skla automobilu o počtu 15 988 trojúhelníků. Pomocí funkce decimate ve VRUTu při použití parametru -45 byl počet zredukován o 89,78 % na 1634 trojúhelníků. Je možné pozorovat značné zvětšení jednotlivých trojúhelníků a zároveň rozhození pravidelnosti trojúhelníkové sítě.

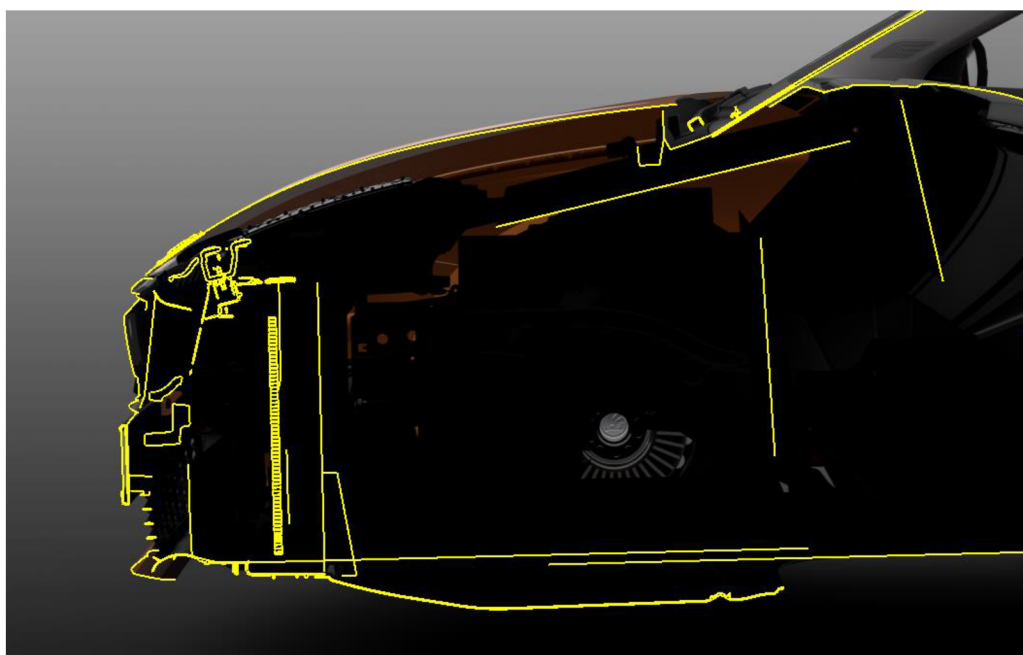


*Obrázek 20 Trojúhelníková síť předního skla po redukci parametrem -45, 1634 trojúhelníků*

Zdroj: vlastní zpracování

## 3.2 Odstranění nepotřebné geometrie

Veškeré objekty, které jsou umístěny ve scéně, jsou během renderování určitým způsobem zpracovávány. To znamená, že i když objekty ve finální vizualizaci nevidíme, stále je s nimi počítáno během vykreslování. Nejčastěji lze tento jev pozorovat u modelů, které mají jak exteriér, tak interiér a skládají se z mnoha částí. U modelu automobilu, který je využitý pro vizualizaci exteriéru je tedy nevhodné, aby obsahoval motor a další strojní součástky. Pro optimalizaci modelu je tedy možné odstranit takovou geometrii, která se nachází mimo renderovaný obraz, nebo je zakrytá jinými objekty. Na obrázku 21 je možné pozorovat středový řez testovaným automobilem. Jedná se o přední část automobilu, kde by se měl nacházet motor. Žlutou barvou jsou zvýrazněny hrany veškerých geometrií, které řez protnul. Kdyby se jednalo o kompletní model automobilu, tak by se žlutých hran v obrázku nacházelo mnohem více. Jedná se však o model využívaný pro vizualizace, takže neobsahuje nepotřebné geometrie, jako právě motor.



Obrázek 21 Středový řez automobilem se zvýrazněnými hranami

Zdroj: vlastní zpracování

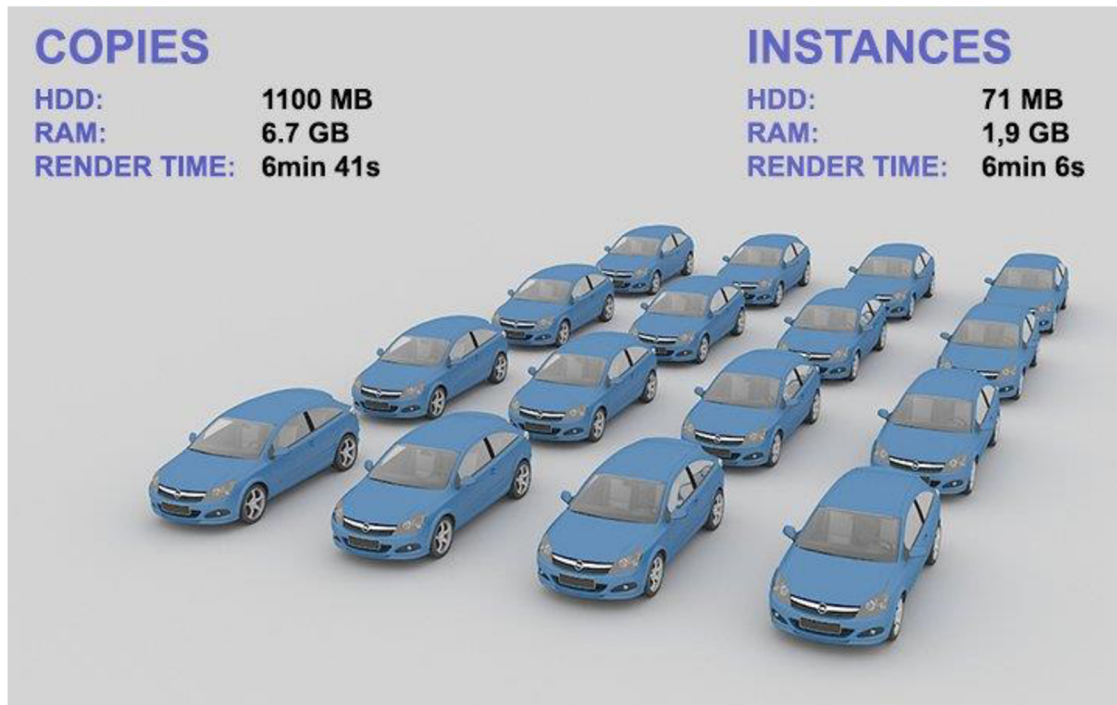
K dispozici jsou dvě metody, jak odstranění dosáhnout. Manuální úpravou modelu a výběrem geometrií, nebo pomocí automatických nástrojů softwaru, které však nejsou tak rozšířené a přesné. Výhodou odstranění nepotřebné geometrie jsou tedy nižší nároky na výpočetní výkon a paměťové zdroje, což může výrazně snížit čas potřebný k vykreslení scény. Méně geometrie také znamená menší soubor s 3D modelem, což usnadňuje jeho sdílení a distribuci.



### 3.3 Použití instancí místo kopií

Použití instancí místo kopií je technika, která umožňuje efektivněji renderovat scény s opakujícími se prvky. Jako příklad lze uvést budovy nebo rostliny. V automobilovém průmyslu jsou to zasymetrické geometrie, kterých není tolik, ale jsou trojúhelníkově náročné. Místo vytváření každého prvku jako samostatné kopie je využívána pouze jedna instance daného prvku. A ta je poté vložena do scény na více místech. Při vytváření kopií je nový objekt uložen v paměti a na pevném disku. U instancí se jedná pouze o uložení do paměti a v souboru scény ponechá pouze data jedné sítě. (Mos 2016)

Výhodou je tedy snížení výpočetní náročnosti a nároků na paměťové zdroje. Všechny instance sdílí stejný objekt a jeho data jsou uložena pouze jednou. To znamená, že je do scény možné umístit obrovské množství stejných objektů. Ty však budou využívat prakticky stejné množství paměti RAM a zabírat místa na disku jako jediný objekt. Další výhodou použití instancí místo kopií je rychlejší a jednodušší úprava prvků v celé scéně. Jakékoli změny provedené na instanci se projeví na všech jejích výskytech. To celkově usnadňuje úpravu scény a ušetří čas při opravách. (Mos 2016)

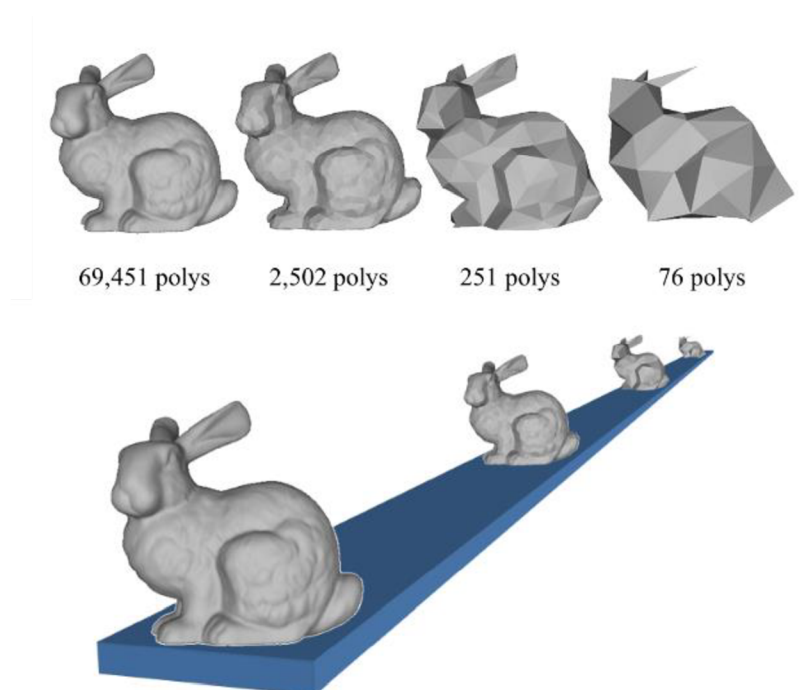


Obrázek 22 Dopad použití instancí místo kopií na zabrané místo, využití RAM a čas vykreslování  
Zdroj: Mos 2016

### 3.4 Level of detail

Level of detail neboli LOD je další z technik pomáhající s optimalizací výkonu při vykreslování scény. LOD je využíván k řízení množství detailu, který je vykreslován v závislosti na pozici pozorovatele a na vzdálenosti mezi pozorovatelem a objektem. To znamená, že LOD umožňuje zobrazovat méně detailů u vzdálených objektů a více detailů, když jsou blízko. Ne všechny objekty ve scéně musí mít nejvyšší úroveň detailu, hlavně pokud se jedná o objekty v pozadí, nebo pokud nejsou hlavním objektem renderované scény. (Luebke et al. 2003)

Výpočetní výkon potřebný k vykreslení scény se výrazně zvyšuje s rostoucím množstvím detailů. V případě zobrazení vysokých detailů v celé scéně může docházet k celkovému zpomalení a tím i k horšímu uživatelskému zážitku. Proto je vhodné využívat LOD, který bude dynamicky snižovat počet detailů objektů v závislosti na vzdálenosti od pozorovatele. Existují různé způsoby, jak je LOD aplikován. Geometrické metody využívají zjednodušených verzí modelů s menším počtem trojúhelníků a fyzického detailu. Texturové metody zas využívají snížení rozlišení textur pro vzdálené objekty. Metody se také vzájemně kombinují. Na obrázku 23 je možné pozorovat aplikaci LOD pomocí snížení počtu trojúhelníků. Čím dále se model králíka na obrázku nachází, tím méně detailní model je možné použít, aniž by bylo možné pozorovat změnu. (Luebke et al. 2003)



Obrázek 23 Aplikace LOD pomocí redukce trojúhelníků  
Zdroj: Game Dev Academy 2015

LOD je nejčastěji využíván v počítačových hrách, kde se scény v otevřených světech mohou skládat z mnoha objektů v různých vzdálenostech. Využitím LOD je možné rychlé a plynulé vykreslení scény bez nutnosti počítače s obrovským výpočetním výkonem. LOD je také využíván v architektonických vizualizacích, nebo v oblasti filmového průmyslu, kde kompletní vysokou úroveň detailu mají převážně jen klíčové scény. (Denham 2022)

### 3.5 Redukce textur

Textury jsou velice důležitým prvkem 3D renderingu a mají velký vliv na celkový vzhled scény. Mohou být použity pro vytvoření prostorových detailů, povrchových prvků a celkového vzhledu. Tyto prvky vytvářejí realističtější a přesvědčivější finální vizualizaci. Textury však také zpomalují rychlost renderování a zvyšují nároky na výpočetní výkon.

Existují různé způsoby, jak optimalizovat textury a minimalizovat jejich vliv na rychlost renderování. Použití textur se správným rozlišením je jednou z nich. Může se stát, že textury jsou mnohem větší, než by reálně být musely. Velikost textury je přímo úměrná množství paměti, která je potřebná pro uložení textury a pro její zpracování během renderování. Pokud je textura aplikována na plochu, která je v poměru s celkovou velikostí vykreslovaného modelu malá, v rozlišení 4K, tak to znamená zbytečné plýtvání rozlišením navíc a také celkově pomalejší načítání a vykreslování. Správné je použít takové rozlišení, které bude odpovídat poměru zabrané plochy.

Podobnou roli hraje také datový formát, v kterém je textura uložena. Různé formáty mají rozdílnou datovou velikost a vlastnosti, hodící se v závislosti na typu a účelu použití textur. Běžný formát JPEG je vhodný pro difuzní nebo barevné mapy, ale při kompresi může docházet k tvorbě artefaktů a redukcí kvality. PNG je bezztrátový formát, který podporuje průhlednost, ale zas má větší velikost souborů. DDS je formát, který podporuje mipmapy, což jsou menší verze textur, které se používají u vzdálených objektů pro snížení aliasingu. Pravidlem je, že by měl být vybírán takový formát, který odpovídá optimálnímu použití pro daný případ aplikování textury. (Nguyen 2008)

Další možností je využití mipmappingu. Mipmapping je proces, během kterého se vytváří řada textur různých rozlišení, které se používají v závislosti vzdálenosti objektu od kamery. Při velké vzdálenosti od kamery se automaticky aplikují menší textury s nižším rozlišením, což sníží nároky

na výpočetní výkon. Pokud se objekt nachází blízko kamery, tak se aplikují textury s vysokým rozlišením, aby byly zachovány správné detaily. (Nguyen 2008)

Velice důležitou roli hraje také počet aplikovaných textur na model. Čím více textur je na model aplikováno, tím větší bude náročnost a počet vykreslovacích příkazů. Nejčastěji se počet textur snižuje pro vykreslování v reálném čase, převážně ve videoherním průmyslu. Je možné uvést příklad krychle, která by měla na každou plochu aplikovanou jednu texturu. Bude se vykreslovat výrazně pomaleji ve srovnání s krychlí, u které bylo všech šest textur spojeno v jedinou texturu. Platí tedy pravidlo, že je vhodné omezit počet aplikovaných textur, v ideálním případě pouze na jednu.

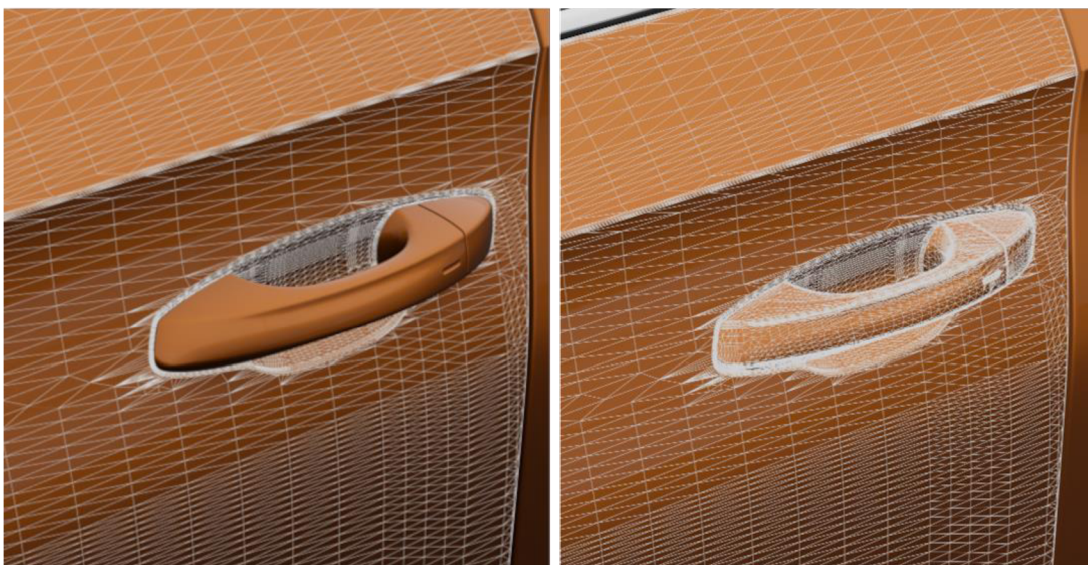
### **3.6 Snížení komplexity hierarchie**

Snížení komplexity hierarchie patří k další z možností, jak optimalizovat model a zlepšit výkon během vykreslování. Tato metoda se snaží o snížení celkového počtu prvků v hierarchii objektu, aby se minimalizovala zátěž na grafický procesor. Hierarchie objektů představuje organizaci a strukturování objektů v rámci 3D modelu a scény. Tato hierarchie může být velice komplexní a může obsahovat mnoho vrstev a uzlů. Hlavně konstrukční data jsou známa tím, že jediný prvek modelu může být vnořen několik desítek uzlů hluboko. Pro každý jednotlivý prvek musí software hierarchií projít, a pokud je prvků mnoho, tak může dojít ke zpomalení.

Existují různé způsoby, jak komplexitu hierarchie objektů snížit. Jedním z přístupů je odstranění takových prvků z hierarchie, které nejsou nezbytné pro správné fungování scény. Takové prvky mohou být například skryté a nevyužívané objekty. Nebo prázdné uzly, které v hierarchii zbyly z modelování, ale neobsahují žádnou část modelu. Další možností je slučování hlubokých uzlů do jednoho uzlu. Tímto způsobem se sníží počet vykreslovacích příkazů a také složitost hierarchie. Pokud jsou všechny prvky jen tak hluboko, jak je pro orientaci v hierarchii nutné, tak není potřeba během vykreslování scény procházet zbytečně složité struktury, což vede ke zvýšení výkonu. (Aversa, Dickinson 2019)

### 3.7 Spojení geometrie

Spojení geometrie představuje techniku, při které se snižuje celkový počet vykreslovaných objektů ve scéně. Tento proces probíhá tak, že se spojí více samostatných geometrií se stejnou úrovní a materiálem nebo texturou do jedné větší geometrie. Tímto způsobem se sníží počet renderovacích příkazů, které jsou potřebné k zobrazení scény. Na obrázku 24 je možné pozorovat trojúhelníkovou síť dveří před a po spojení geometrií v softwaru VRUT. Klikla, která byla původně samostatná geometrie se stala součástí geometrie dveří.



Obrázek 24 Spojení geometrie dveří a kliky v softwaru VRUT

Zdroj: vlastní zpracování

Spojování geometrie je obzvláště užitečné v případech, kdy se ve scéně nachází mnoho malých objektů se stejnými vlastnostmi, jako jsou například kameny nebo rostliny. Tyto objekty by jednotlivě vyžadovali mnoho vykreslovacích příkazů, které zpomalují grafickou kartu. V praktickém příkladu konstrukčních dat se může jednat o spojovací šrouby. Spojením do jedné geometrie dosáhneme nejen redukce počtu geometrií, ale také snížení komplexity hierarchie stromu a zefektivnění výběru těchto geometrií a manipulace s nimi. S dnešním výpočetním výkonem grafických karet obecně platí, že mnohem lépe počítají menší počet náročnějších příkazů oproti velkému počtu nenáročných příkazů, jako je například geometrie v rozmezí stovek trojúhelníků. Po spojení geometrií do většího celku dochází k redukci příkazů na jeden. To umožňuje efektivnější využití hardwarových zdrojů a zlepšení výkonu. (Aversa, Dickinson 2019)

### 3.8 Vyčištění scény a modelu

V rámci optimalizace pro 3D rendering může být nutné model a scénu takzvaně vyčistit. Můžou obsahovat různé prvky, které jsou zbytečné a zvyšují výpočetní náročnost. Jako první příklad lze uvést odstranění duplicitní geometrie, které se provádí za účelem snížení počtu trojúhelníků. Duplicitní geometrie nemusí být snadná na odhalení, jelikož sdílí totožnou pozici s původní geometrií. Proto je tento krok prováděn pomocí automatických nástrojů, které detekují a sloučí identické prvky do jediného objektu.

Dalším příkladem může být odstranění duplicitních materiálů a textur. Podobně jako u geometrie, i u materiálů a textur může docházet k duplicitě, které zbytečně zatěžují výpočet. Tyto prvky se pak také slučují do jediné instance. Kromě duplicity se výše zmíněné prvky mohou potýkat s tím, že nejsou vůbec použity. Na to je možné nejčastěji narazit v rozsáhlých scénách, na kterých dlouho pracovalo několik různých designérů, a jednotlivé prvky scény se často přidávaly a odebíraly. Veškeré nepoužité prvky by měly být odstraněny. Obecně platí, že ve scéně by se neměly nacházet žádné duplicitní nebo nevyužité prvky.

### 3.9 Správně otočené normály

Normály jsou významným prvkem v rámci 3D renderingu. Jsou to vektorové hodnoty, které určují směr každého povrchu a vrcholu v trojrozměrném prostoru. Normály jsou důležité, protože umožňují vypočítat, jakým způsobem se bude povrch modelu chovat pod osvětlením. Každý vrchol a plocha 3D modelu má svou vlastní normálu, která je kolmá na povrch v daném bodě. Normála může být orientována v různých směrech a tuto orientaci lze upravovat tak, aby byla kompatibilní s osvětlením a dalšími faktory, jako jsou stíny nebo odlesky. Správně orientované normály umožňují vypočítat, jak se bude povrch chovat v různých světelných podmínkách. (Gregory 2018)

Během vykreslování se normály používají k výpočtu osvětlení povrchu 3D modelu. Pokud je normála kolmá na směr světla, bude povrch maximálně osvětlen. Pokud je normála v jiném směru, bude povrch osvětlen různým způsobem v závislosti na odchylce od kolmosti. To vede k vytvoření stínů, odlesků a dalších efektů, které přispívají k vytvoření realistického vzhledu vizualizace. Během tvorby modelu, nebo při otevírání v jiném než původním softwaru a změně datového formátu může dojít k chybnému otočení normál. Tyto invertované normály následně zabraňují správnému výpočtu stínování a vznikají chybné stíny a artefakty během vykreslování.

Chybné stínování může mít lehký dopad na výkon, ale hlavně znehodnocuje finální výstup, čímž je ztracen čas, který bude muset být využit na nový render. Proto je důležité kontrolovat správnou orientaci normál a ty invertované otočit správně. (Gregory 2018)

### 3.10 Optimalizace osvětlení a stínů

Volba správného osvětlení může mít velký dopad na optimalizaci scény. Mezi možnosti patří využití zabezčených stínů, osvětlení v reálném čase a kombinace těchto dvou metod. Využití se pak dále odvíjí od toho, jestli je scéna a její součásti statická, nebo dynamická. Statickým objektem ve scéně lze nazvat cokoli, co zůstane v klidu. Může se jednat o prostředí i jednotlivé prvky scény, se kterými není možné interagovat a jejich pozice se za žádných okolností nezmění. Dynamický objekt je pravý opak. Ve videoherním průmyslu není lepšího příkladu dynamického objektu než hráčova postava. Ta se za většiny okolností neustále pohybuje a interaguje s dalšími různými objekty ve scéně. Dynamické jsou ale i objekty, které se zprvu nehýbou, ale může s nimi být určitým způsobem interagováno a pohnuto. Dynamická může být také jen část objektu. Jako příklad lze uvést zanimovanou část automobilu. Zatímco většina automobilu zůstává statická, tak určitá animovaná část, jako třeba otevírající se dveře se stávají dynamickým objektem. (Eisemann et al. 2011)

Zapékání neboli také předpočítání stínů je proces, při kterém se stíny objektů ve scéně vypočítají a uloží k textuře nebo materiálu, která se poté použije při vykreslování scény. Zapečené stíny jsou ve své podstatě použitím statického osvětlení. Pokud objekt vrhá stín pomocí zapečení a objektem je pohnuto, stín se nepohne, dokud se neaktualizují informace o zapečení. Pokaždé, když se ve scéně pohne zdrojem světla, objektem vrhající stín nebo odrážející světlo, bude se muset osvětlení scény znovu zapéct, než se vizuální změny projeví správně. V závislosti na počtu objektů, světla a celkové komplexnosti scény může být zapékání stínů poměrně časově náročné. Zapečené stíny již ale nemusí být počítány, což pro statické scény ušetří další výpočetní zdroje. (Eisemann et al. 2011)

Na obrázcích 25 a 26 je možné pozorovat rozdíly, jak vypadá model automobilu s a bez zabezčených stínů. Model automobilu se zabezčenými stíny působí přirozeně a realisticky, jelikož v reálném životě se stíny nachází všude a lidé jsou zvyklí, že přibližně takto by to mělo vypadat. Ve srovnání s tím model automobilu bez zabezčených stínů působí, jak kdyby byl do obrázku jen přidán, jako že tam zcela nepatří. To je způsobeno absencí stínů. Mezi nejvýraznější chybějící stíny

patří stín, který by automobil vrhal na rovinu, na které je položen. Dále jsou pneumatiky moc světlé a viditelné i přesto, že jsou částečně zakryté a tudíž by se na nich také měl nacházet stín. Nepřirozeně přesvětlené jsou také světlá, interiér vozu, mřížka pod poznávací značkou nebo okolí klik na dveřích automobilu.



*Obrázek 25 Model automobilu se zapečenými stíny*

Zdroj: Vlastní zpracování

Navíc zapečené stíny skvěle spolupracují s globálním osvětlením. Skutečný zdroj světla se bude odrážet od jednoho objektu na jiný. V závislosti na síle světla a vlastnostech materiálu může světlo provádět několik dalších odrazů v řadě mezi objekty ve scéně. Toto odražené světlo dodá přirozený dojem jinak zcela tmavým místům scény. Právě tyto jemné detaily z nepřímo odražených zdrojů světla jsou jednou z hlavních vlastností globálního osvětlení. Zapečené světlo a stíny patří mezi hlavní prvky, co odráží světlo od objektů a materiálů dál a má velký podíl na globálním osvětlení. (Amlin 2022)





*Obrázek 26 Model automobilu bez zabezpečených stínů*

Zdroj: vlastní zpracování

Osvětlení v reálném čase je pak opakem zabezpečeného osvětlení. Tato světla a stíny se aktualizují s každým snímkem v reálném čase. Pokud je pohnuto s objektem, který vrhá stín při osvětlení v reálném čase, tak stín se bude pohybovat s objektem. Odrazy světla a osvětlované objekty se aktualizují okamžitě. Světla v reálném čase jsou tedy ideální pro osvětlení a vrhání stínů pro dynamické objekty a scény. Osvětlení v reálném čase funguje také i na statické objekty. V rámci optimalizace je tedy vhodné osvětlení statických a dynamických prvků oddělit pomocí světelných vrstev nebo jiné funkce. Pro pohybující se prvky bude využito nezbytné osvětlení v reálném čase a pro statické prvky je možné ušetřit výpočetní výkon pomocí zabezpečení osvětlení. (Amlin 2022)

## 4 Návrh optimalizačních kroků

Výstupem této kapitoly jsou statistiky dopadu jednotlivých optimalizačních kroků dostupných v softwaru VRUT 2.2.0 na výkon a optimalizaci modelu. Kroky byly aplikovány na komplexní 3D model automobilu Škoda Fabia, jehož specifikace jsou upřesněny v podkapitole 4.1 parametry optimalizovaného dílu. Testování probíhalo na třech zařízeních. Na silné výpočetní stanici, na grafickém notebooku a na kancelářském notebooku. Přičemž hlavním zaměřením je dosažení co nejlepšího výkonu na slabších zařízeních. Vzhledem ke komplexnosti modelu i výpočetní náročnosti raytracingu nelze tento režim renderování provádět na slabších zařízeních. Rendering tedy bude probíhat skrz grafické API Vulkan, což je druhá metoda renderingu, kterou VRUT podporuje a zakládá se na principu rasterizace. Kvalita vykreslování bude v softwaru nastavena na střední, jelikož od střední kvality se zobrazují předpočítané stíny.

Sledovány byly průměrné snímky za vteřinu při renderování exteriéru automobilu v reálném čase. Zároveň byla vykreslována animace otevírání předních dveří automobilu. Kamera byla využita předpřipravená z modelu, a to izometrický přední pohled, který má v záběru celý automobil. V potaz byly brány různé parametry, jako je počet samplů nebo rozlišení renderovacího okna. Kromě dopadu na výkon byla zjišťována i přívětivost pro uživatele. Tedy jak náročné je optimalizační krok provést, nebo jak dlouho potrvá jeho aplikace.



*Obrázek 27 Izometrický přední pohled pro testování*

Zdroj: vlastní zpracování

## 4.1 Parametry optimalizovaného dílu

K optimalizaci byl společností Škoda Auto a.s. poskytnut 3D model automobilu Škoda Fabia. Jelikož je práce zaměřena na automobilový průmysl, tak se jedná o velice komplexní model, který by v jiných odvětvích neměl při takovýchto detailech využití. Model se skládá ze sítě obsahující 111 619 189 trojúhelníků, 334 857 555 vrcholů a 86 984 355 unikátních vrcholů. Počet vrcholů by měl odpovídat přesně trojnásobku počtu trojúhelníků. Model jich obsahuje o 12 méně, než je předpokládaný počet, což ukazuje na pár chyb v trojúhelníkové síti. Dále obsahuje 1 918 unikátních geometrií, tedy počet dílů, z kterých se sestava skládá. Pokud jsou započítány i geometrie, které se v modelu opakují, jako jsou například části sedačky, tak model obsahuje 2 365 geometrií. Model dále obsahuje 266 jedinečných materiálů s různými vlastnostmi a 100 aplikovaných textur. Datová velikost souboru je 2 802 MB. Vzhledem k citlivosti dat, jako jsou kompletní 3D modely automobilů patří poskytnutý model k často používanému modelu k ukázkám. To znamená, že kromě vysokého počtu polygonů je obecně poměrně dobře optimalizovaný v porovnání s například konstrukčními CAD daty.

## 4.2 Parametry testovaných zařízení

V rámci testování dopadu optimalizace na výkonnost byla vybrána zařízení ze tří výkonnostních kategorií: pracovní stanice, přenosná pracovní stanice a kancelářský notebook. Tato zařízení reprezentují pomyslný výkonnostní standart v dané kategorii a žádné zařízení není starší pěti let.

Nejvýkonnější kategorii reprezentuje pracovní stanice HP Z8 G4. Pracovní stanici si je možné představit jako mnohonásobně výkonnější verzi stolního počítače. Často jsou účelově využívány pro specifické náročné úkony, nikoliv pro běžné aplikace. Toto zařízení disponuje dvěma procesory Intel Xeon Gold 6230, což mu umožňuje zpracovávat velké množství dat v krátkém čase. Dále je vybaveno 192 GB RAM DDR4. A dvě grafické karty NVIDIA RTX A6000 zajišťují vynikající výkon při výpočtu náročných grafických úloh. Vzhledem k vlastní konfiguraci hardwaru této pracovní stanice jí není možné běžně zakoupit. Cena komponent se pohybuje v rozmezí 200 000 Kč až 250 000 Kč, pokud není započítána dualita komponent, která na testování neměla vliv.



*Obrázek 28 Pracovní stanice HP Z8 G4*

Zdroj: HP 2023

Střední kategorii reprezentuje přenosná pracovní stanice HP Zbook 15 Fury G7. Přenosná pracovní stanice je notebook s nadstandardní výpočetní silou, která není pro notebook typická. Tato výkonná zařízení se především používají pro grafiku a další výpočetně náročné úlohy. Toto zařízení je vybaveno procesorem Intel Core i7 10850H, který poskytuje vynikající výkon při náročnějších pracovních úlohách. Dále je vybaveno 32 GB RAM DDR4. A grafická karta NVIDIA Quadro T2000 poskytuje slušný výkon při náročných grafických úlohách. Produkt byl naposledy prodáván v roce 2021 s cenou kolem 55 000 Kč.



*Obrázek 29 Přenosná pracovní stanice HP Zbook 15 Fury G7*

Zdroj: HP 2023

Běžnou kategorii reprezentuje klasický kancelářský notebook HP EliteBook 840 G6. Toto zařízení je vybaveno procesorem Intel Core i5-8365U, který poskytuje solidní výkon pro běžné pracovní úlohy. Dále je vybaveno 8 GB RAM DDR4. A integrovaná grafická karta Intel UHD Graphics 620 je

68

dostatečná pro základní grafické úlohy. Integrované grafické karty jsou obvykle připojeny přímo k procesoru. To znamená, že pracuje dohromady s procesorem a využívají stejnou paměť RAM. Výpočetní výkon procesoru je tedy rozdělován mezi akce, které běžně vykonává procesor a grafická karta. To má za následek menší výpočetní výkon zařízení. Notebook byl naposled prodáván v roce 2021 s cenou v rozmezí mezi 26 000 Kč až 30 000 Kč.



*Obrázek 30 HP EliteBook 840 G6*  
Zdroj: HP 2023

Na obrázku 31 je možné vidět výsledné hodnocení testovaných grafických karet, které obdržely v benchmarkových testech od společnosti PassMark. Tato společnost vyvíjí software pro benchmarkové testování hardwaru počítačů. Hodnocení G3D se skládá z výsledků výkonu pro všechny generace DirectX, získaných od rozsáhlého počtu uživatelů, kteří benchmark testy provedli. Výsledky ukazují, že v porovnání s pracovní stanicí je grafická karta přenosné pracovní stanice o 68,3 % slabší. Integrovaná grafická karta kancelářského notebooku dosahuje pouze 4,6 % výkonu pracovní stanice.

	RTX A6000	Quadro T2000	Intel UHD Graphics 620
Average Results (% diff. to max in group)			
DirectX 9	230 FPS (998.9%)	122 FPS (485.2%)	21 FPS
DirectX 10	320 FPS (4352.6%)	69 FPS (856.9%)	7 FPS
DirectX 11	459 FPS (2219.4%)	128 FPS (546.6%)	20 FPS
DirectX 12	91 FPS (1885.7%)	31 FPS (582.5%)	5 FPS
GPU Compute	15599 Ops/Sec (787.0%)	2915 Ops/Sec (65.8%)	1759 Ops/Sec
G2D Rating	885	470 (-46.9%)	245 (-72.4%)
G3D Rating	<b>22607</b>	<b>7174</b> (-68.3%)	<b>1036</b> (-95.4%)

Obrázek 31 Výsledky benchmark testů grafických karet

Zdroj: Videocardbenchmark 2023

Výsledné skóre procesoru, na obrázku 32, je sestaveno z osmi různých testů zaměřených na různé výpočetní operace. Data jsou získávána stejným způsobem jako u grafických karet od rozsáhlého počtu uživatelů. Získané výsledky ukazují, že procesor přenosné výpočetní stanice je o 55,4 % slabší než procesor výpočetní stanice. Procesor kancelářského notebooku dosahuje pouze 23,3 % výkonu procesoru výpočetní stanice.

	Intel Xeon Gold 6230 @ 2.10GHz	Intel Core i7-10850H @ 2.70GHz	Intel Core i5-8365U @ 1.60GHz
CPU Mark	<b>26888</b>	<b>11983</b>	<b>6257</b>
(% diff. to max in group)	(0.0%)	(-55.4%)	(-76.7%)

Obrázek 32 Výsledky benchmark testů procesorů

Zdroj: Cpubenchmark 2023

### 4.3 Výkon bez optimalizace

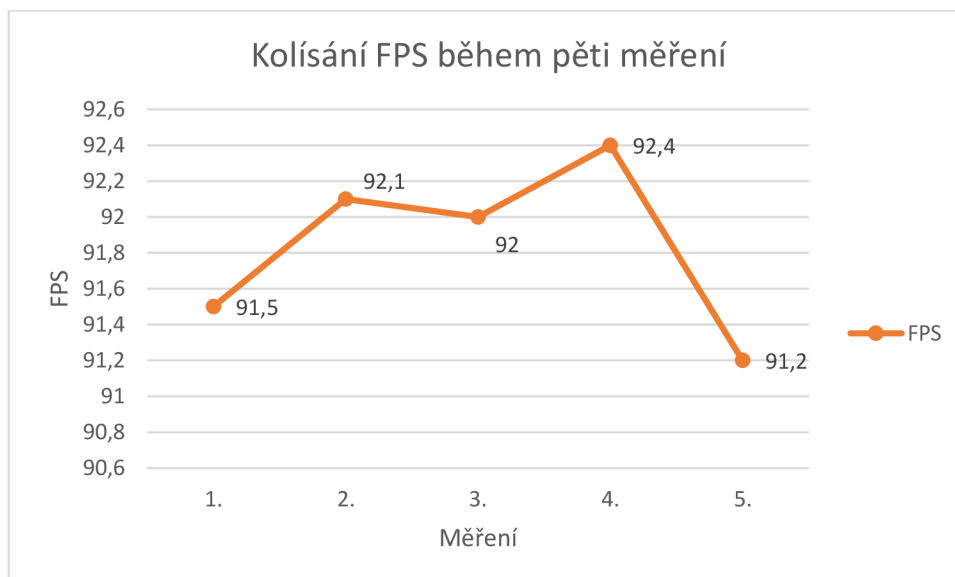
Pro účely kontrolního měření výkonu bylo použito rozlišení 1920x1080, dle postupu uvedeného v úvodu kapitoly. K testování byly použity čtyři úrovně anti-aliasingu, konkrétně 1, 2, 4 a 8. Na pracovní stanici trvalo načtení modelu 12,9 sekundy, zatímco na přenosné pracovní stanici trval tento proces 13,6 sekundy. U kancelářského notebooku se však projevuje vysoká náročnost scény bez optimalizace, neboť je neschopný scénu načíst. V logovacím okně je vypsáno varování, že grafická karta nemá dostatek paměti a i přes pokusy o uvolnění více paměti, není možné s načtením pokračovat. Znak X v tabulce značí, že scénu nebylo zařízení schopné načíst.

Tabulka 23 Výkon bez optimalizace

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	91,8 FPS	82,2 FPS	67,9 FPS	48,7 FPS
Přenosná stanice	17 FPS	13,6 FPS	10,1 FPS	5,94 FPS
Kancelářský notebook	X	X	X	X

Zdroj: vlastní zpracování

Pro účely měření výkonu byla použita metoda měření průměrného počtu snímků za sekundu. Nicméně bylo pozorováno nestabilní chování FPS, které se neustále měnilo. Pro zajištění větší přesnosti bylo proto provedeno vždy opakované měření a bylo vybráno pět hodnot. Tyto hodnoty byly poté zprůměrovány pomocí aritmetického průměru, což vedlo k výslednému průměrnému počtu snímků za sekundu v tabulkách.



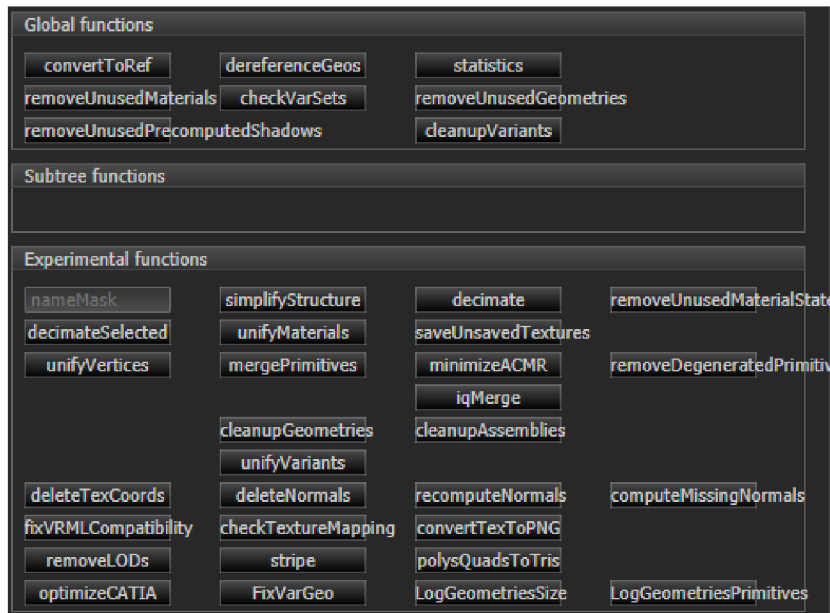
Obrázek 33 Graf kolísání FPS během měření

Zdroj: vlastní zpracování

## 4.4 Modul optimize

Pro optimalizaci 3D modelu obsahuje software VRUT modul optimize. Jedná se o souhrn vestavěných funkcí, které pomáhají s optimalizací, případně odstraňují problémy vznikající při importu a exportu scény. Obsahuje 8 funkcí, které lze považovat za zcela hotové a stabilní. Zbytek se řadí pod experimentální funkce, které nemusí být zcela vyladěné a otestované. To znamená, že jejich výsledky nemusí být optimální a může dojít k chybám. Modul nemá pro jednotlivé funkce uživatelské rozhraní. Celý proces a výsledky jsou tedy vypisovány do konzole.

Každá funkce, která provedla nějaké změny, byla otestována s ohledem na její účinnost v rámci optimalizačního procesu. Funkce byly testovány na takovém stavu modelu, který je zařízení schopné načíst. Pro pracovní stanice se jedná o původní soubor bez zásahů. Pro kancelářský notebook bylo nutné použít model s -10 % decimací trojúhelníků. Vzhledem ke kolísání průměrných hodnot FPS během měření a někdy velmi malému vlivu funkcí na data neměla žádná funkce s vlivem na data dostatečný dopad na průměrné FPS. Rozdíly se pohybovaly v rozmezí 0,5 FPS, což je možné připsat kolísání. Z tohoto důvodu nebyla u žádné z těchto funkcí samostatně uvedena tabulka s dopadem na průměrné snímky za vteřinu.



Obrázek 34 Modul optimize

Zdroj: vlastní zpracování



#### 4.4.1 Funkce s efektem na data

- **CleanupVariants** – Tato funkce odstraňuje prázdné varianty a materiálové varianty bez přiřazeného materiálu. Varianty jsou přepínače, seskupení materiálů umožňující rychlou změnu například laku automobilu nebo vnitřních potahů. Funkce z modelu odstranila 164 prázdných variant.
- **UnifyVerticles** – Tato funkce je využívána ke spojení všech vrcholů, které mají stejné souřadnice, normálu i texturovací souřadnice. V modelu se nacházelo 7 vrcholů se stejnými souřadnicemi, které byli spojeni. V poměru s celkovým počtem vrcholů, který je téměř 87 milionů, je 7 sloučených vrcholů zanedbatelná hodnota.
- **UnifyMaterials** – Tato funkce slučuje veškeré materiály, které mají totožné vlastnosti a liší se pouze v jejich pojmenování. V modelu se nacházelo 10 materiálů, které funkce spojila.
- **CleanupGeometries** – Tato funkce odstraňuje všechny prázdné geometrie a geometrické uzly. V modelu se nacházely dva prázdné geometrické uzly a jedna prázdná geometrie.
- **MinimizeACMR** – ACMR neboli Average Cache Miss Ratio je unikátní číselný ukazatel softwaru VRUT. Popisuje, jak dobře je při výpočtech využita cache grafické karty. Optimální hodnota je kolem 1 a níže. Funguje na principu setřídění všech vrcholů geometrie pro rendering. Původní hodnota ACMR modelu byla 1,0735. Použitím funkce došlo k optimalizaci na 0,8153 ACMR.
- **IqMerge** – Tato funkce spojuje veškeré geometrie, které se ve stromě modelu nacházejí na stejné úrovni a mají přiřazený stejný materiál. Jako příklad lze uvést kliku dveří automobilu, která přestane být samostatnou geometrií, ale spojí se s geometrií venkovní části dveří. Výjimkou jsou geometrie sdílené mezi více uzly a geometrie bez normál. Použitím funkce došlo ke sloučení 633 geometrií. To se rovná snížení počtu geometrií o celých 33 %.
- **CleanupAssemblies** – Tato funkce odstraňuje všechny prázdné uzly a přepínačové uzly. V modelu se nacházelo 14 těchto prázdných uzlů.
- **ConvertTexToPNG** – Tato funkce konvertuje veškeré textury formátů BMP, RGB, GIF, TIF a TGA do formátu PNG, který dosahuje vyšší komprese. V modelu byly nalezeny dvě textury, které funkce převedla do formátu PNG. Tato funkce má vliv hlavně na velikost souboru na disku.

#### 4.4.2 Kombinace všech funkcí s efektem na data

Veškeré optimalizační kroky, které měly nějaký efekt na model se samostatně na výkonu pracovní stanice nepromítly. Při zkombinování mají již pozorovatelný efekt. Veškeré tyto kroky jsou aktivovány kliknutím na tlačítko a jsou provedeny instantně. Z čehož vyplývá, že časová náročnost podniknutí této optimalizace je minimální.

Tabulka 24 Kombinace optimalizačních funkcí s efektem na data

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	91,9 FPS	89,4 FPS	72,9 FPS	51,1 FPS
Přenosná stanice	20,1 FPS	17,7 FPS	14,9 FPS	7,31 FPS
Kancelářský notebook (-10)	3,16 FPS	X	X	X

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.4.3 Funkce bez efektu na data

Vzhledem k povaze poskytnutých dat, která již prošla nějakým základním procesem optimalizace, neměly funkce v této podkapitole žádný efekt na model. Přesto jejich použití na data, která neprošla žádnou optimalizací, jako například konstrukční data ze softwaru CATIA, může mít znatelný dopad na optimalizaci dat.

- **ConvertToRef** – Tato funkce nahradí duplicitní geometrie ve scéně referencemi. Referencování snižuje spotřebu paměti počítače i paměti grafické karty a produkuje menší soubory.
- **RemoveUnusedMaterials** – Tato funkce odstraní veškeré materiály, které nejsou využity ve scéně.
- **RemoveUnusedPrecomputedShadows** – Tato funkce odstraní veškeré nepoužité předpočítané stíny ze scény.
- **RemoveUnusedGeometries** – Tato funkce odstraní veškeré nepoužité geometrie, které nejsou použité v žádném uzlu. Pokud je ve VRUTu odstraněna geometrie, tak stále zůstává v paměti a například ve statistikách je pořád započítávána do celkového počtu trojúhelníků. Proto je vždy důležité zkontrolovat data skrz tuto funkci.
- **UnifyVariants** – Tato funkce slučuje veškeré totožné varianty ve scéně.
- **SimplifyStructure** – Tato funkce zjednodušuje strukturu stromu scény. Smaže jednotlivé uzly, pokud se tím nezmění struktura scény. Například uzel s jedním potomkem je smazán a potomek nahradí původní uzel. Funkce své využití najde nejčastěji při použití na

konstrukčních datech, která jsou známá vysokou složitostí struktury stromu scény. Struktura může jít do hloubky několika desítek uzlů kvůli jedinému potomkovy. Při použití funkce na poskytnutý model dochází k chybnému zjednodušení struktury. To vede ke smazání několika částí karoserie, jak je možné vidět na obrázku 35. Z tohoto důvodu nebyla funkce k optimalizaci vůbec využita.



Obrázek 35 Chybné odstranění geometrií při použití funkce *SimplifyStructure*  
Zdroj: vlastní zpracování

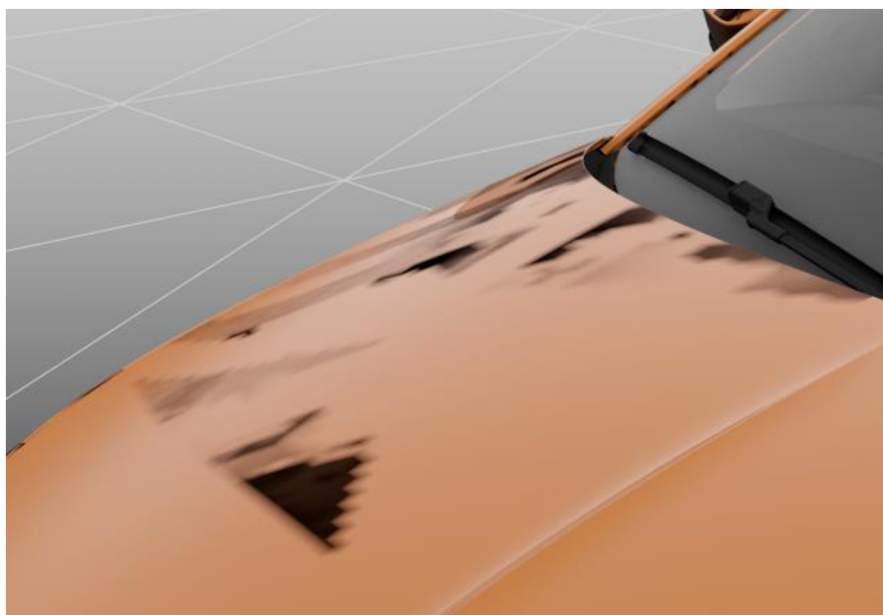
- **MergePrimitives** – Ve všech geometriích se pokusí spojit jednotlivé typy primitiv. V aktuální verzi softwaru VRUT se tato funkce automaticky aplikuje v renderovacím okně. Z toho důvodu její manuální využití postrádá smysl.
- **RemoveDegeneratedPrimitives** – Tato funkce smaže ze všech geometrií degenerované trojúhelníky. To jsou trojúhelníkové primitivy s nulovou plochou umístěné v trojúhelníkové síti.

## 4.5 Decimace trojúhelníků

Snížit počet trojúhelníků ve Vrutu je možné dvěma způsoby. Zaprvé pomocí funkce *DecimateSelected*, která aplikuje decimaci pouze na vybranou část modelu. Tato metoda je častěji využívána u menších modelů a scén, kde je snazší ručně vybrat požadované části. Případně pokud se ve scéně nachází objekt se zbytečným počtem trojúhelníků a je možné ho jednoduše lokalizovat. Druhou možností je funkce *Decimate*, která se aplikuje na všechny geometrie. A to včetně prostředí, jako je rovina pro stín a polokoule HDRI prostředí. Pokud nemá být prostředí ovlivněno, tak je vhodné vybrat například celý automobil a využít funkce *DecimateSelected*.

Pokud není upřesněno jinak, tak defaultně se funkce pokusí zbavit 10 % trojúhelníků. Při dosazení vlastního parametru jsou dvě možnosti. Záporné číslo, které značí procentuální hodnotu snížení trojúhelníků. Tedy parametr -5 znamená, že se funkce pokusí zredukovat 5 % trojúhelníků. Z testování funkce lze pozorovat, že redukce trojúhelníků je mnohem vyšší než předpokládaná procentuální hodnota. Druhou možností je kladné číslo, které označuje, jak moc může být geometrie deformována. S touto hodnotou se obvykle pracuje v rozmezí tisícín. Decimace trojúhelníků je destruktivní metoda, která více či méně pozměňuje trojúhelníkovou síť. To může mít za následek poškození předpočítaných stínů a vzniknutí černých ploch na modelu. Na obrázku 36 je možné pozorovat poškození stínů na kapotě automobilu po decimaci s parametrem -10. Po využití decimace trojúhelníků je tedy vždy nutné dopočítat chybějící a poškozené stíny ve scéně.

V aktuální verzi VREDu 2.2.0 je po zadání parametru do příslušného pole nutné změnu parametru potvrdit stisknutím klávesy Enter. V opačném případě změna parametru není zaznamenána a bude použita defaultní decimace s redukcí o 10 %. Decimace byla prováděna a přesně měřena pouze na pracovní stanici. Soubory poté byly přesunuty do dalších zařízení. Důvodem je časová a výpočetní náročnost na slabších zařízeních. Decimace je počítána pomocí procesoru, od jehož výkonosti se odvíjí celkový čas trvání. Na přenosné pracovní stanici trvala decimace s parametrem -10 o 18,5 % času déle a s parametrem -45 o 70 % času déle ve srovnání s pracovní stanicí. Na kancelářském notebooku trvala decimace modelu s 89 807 652 trojúhelníky s parametrem -10 celých 27 minut a 18 vteřin. Za tuto dobu se proces decimace dostal přibližně do dvou třetin, poté přestala aplikace odpovídat a bylo jí nutné ukončit pomocí restartu zařízení.



*Obrázek 36 Poškození stínů po decimaci s parametrem -10*

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.1 Decimace s parametrem -10

Na pracovní stanici decimace trvala 4 minuty a 30 vteřin. Byl zadán parametr -10. Počet trojúhelníků byl zredukován na 89 807 652 a počet unikátních vrcholů na 73 080 105. Na tvaru modelu nebyla pozorována žádná vizuální změna.

Tabulka 25 Decimace -10

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	91,9 FPS	90,2 FPS	74,2 FPS	52,5 FPS
Přenosná stanice	19,4 FPS	17,2 FPS	14,6 FPS	8,12 FPS
Kancelářský notebook	2 FPS	X	X	X

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.2 Decimace s parametrem -20

Na pracovní stanici decimace trvala 5 minut a 23 vteřin. Byl zadán parametr -20. Počet trojúhelníků byl zredukován na 68 039 023 a počet unikátních vrcholů na 58 696 744. Na tvaru modelu nebyla pozorována žádná vizuální změna.

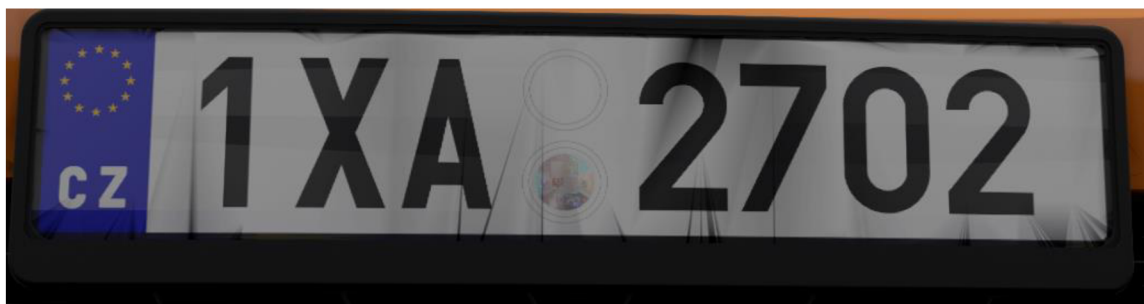
Tabulka 26 Decimace -20

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	93,7 FPS	92,9 FPS	89,3 FPS	61,9 FPS
Přenosná stanice	24,4 FPS	21,3 FPS	17,5 FPS	12,9 FPS
Kancelářský notebook	2,47 FPS	2,15 FPS	1,76 FPS	X

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.3 Decimace s parametrem -30

Na pracovní stanici trvala decimace 6 minut a 22 vteřin. Byl zadán parametr -30. Počet trojúhelníků byl zredukován na 46 260 933 a počet unikátních vrcholů na 43 881 237. Na tvaru modelu nebyla pozorována žádná vizuální změna. Na geometrii poznávací značky se začala objevovat chyba v předpočítaných stínech, jak je možné vidět na obrázku 37. Chybu lze jednoduše odstranit smazáním stínu, jelikož i bez předpočítaného stínu vypadá tato geometrie přirozeně.



Obrázek 37 Chyba v předpočítaných stínech na poznávací značce

Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 27 Decimace -30

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	93,8 FPS	92,7 FPS	92,2 FPS	74,2 FPS
Přenosná stanice	33,4 FPS	28,2 FPS	22,5 FPS	15,6 FPS
Kancelářský notebook	3,32 FPS	2,79 FPS	2,19 FPS	1,40 FPS

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.4 Decimace s parametrem -40

Na pracovní stanici trvala decimace 7 minut a 46 vteřin. Byl zadán parametr -40. Počet trojúhelníku byl zredukován na 24 599 789 a počet unikátních vrcholů na 28 015 072. Na tvaru modelu nebyla pozorována žádná vizuální změna. Chyby ve stínech z předchozí decimací zůstávají. Objevuje se nová chyba v předpočítaných stínech na kapotě v okolí antény.

Tabulka 28 Decimace -40

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	94 FPS	92,7 FPS	92,9 FPS	93,1 FPS
Přenosná stanice	52,4 FPS	42,6 FPS	31,9 FPS	20,5 FPS
Kancelářský notebook	5,58 FPS	4,27 FPS	3,15 FPS	1,89 FPS

Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 38 Chyba v předpočítaných stínech na kapotě v okolí antény

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.5 Decimace s parametrem -45

Na pracovní stanici trvala decimace 8 minut a 19 vteřin. Byl zadán parametr -45. Počet trojúhelníků byl zredukován na 14 151 803 a počet unikátních vrcholů na 19 610 225. Na tvaru modelu již lze pozorovat lehkou deformaci geometrie. Toto je přibližná hranice, kdy se uživatel musí rozhodnout podle využití vizualizace.



*Obrázek 39 Lehká deformace geometrie předních dveří při decimaci s parametrem -45*

Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 39 je možné pozorovat, že při vzdáleném pohledu by byla deformace nepatrná, ale při detailním pohledu na zasažené geometrie je už možné malé chyby v geometrii pozorovat. Pokud

by takováto úroveň deformace představovala problém, tak by bylo nutné parametr decimace snížit. Také se objevují další chyby v předpočítaných stínech.

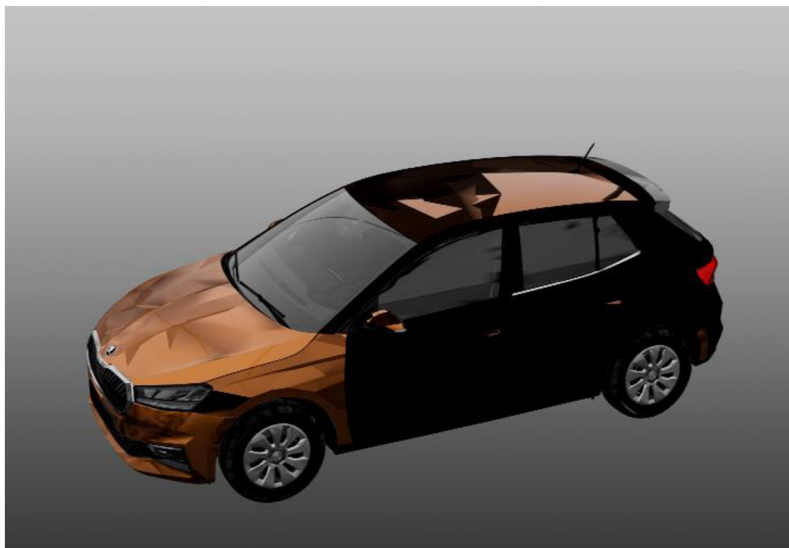
Tabulka 29 Decimace -45

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	93,8 FPS	93,9 FPS	93,5 FPS	93,7 FPS
Přenosná stanice	68,5 FPS	54,9 FPS	40,4 FPS	25,1 FPS
Kancelářský notebook	7,33 FPS	5,42 FPS	3,91 FPS	2,36 FPS

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.6 Decimace s parametrem -50

Na pracovní stanici trvala decimace 9 minut a 40 vteřin. Byl zadán parametr -50. Počet trojúhelníků byl zredukován na 4 509 752 a počet unikátních vrcholů na 9 743 197. Model je po decimaci spíše černý kvůli chybám ve stínech, jak je možné pozorovat na obrázku 40.



Obrázek 40 Poškození stínů po decimaci s parametrem -50

Zdroj: vlastní zpracování

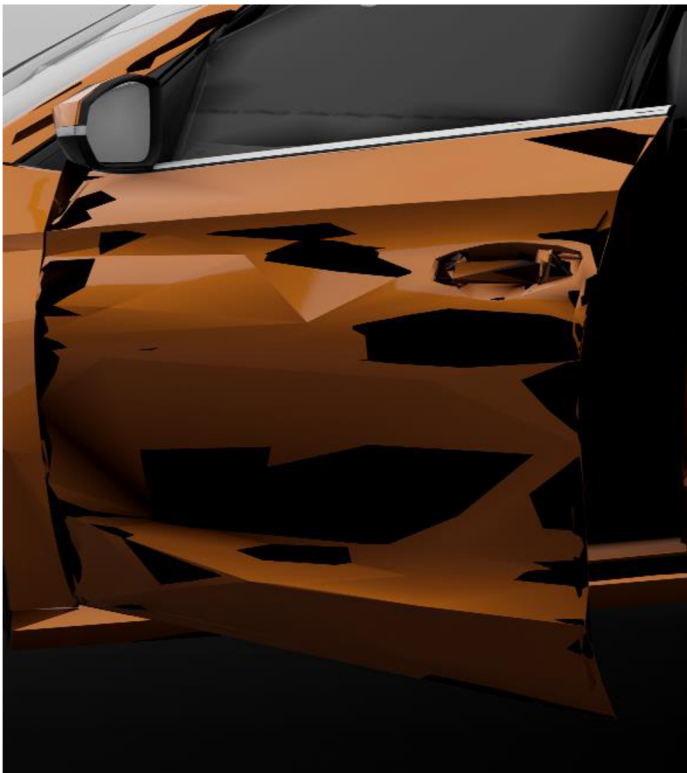
Při takto velkém poškození už není algoritmus na předpočítání stínů schopný takto velké chyby opravit. Jak je možné pozorovat na obrázku 41, na modelu stále přetrvávají černá místa, hlavně v oblastech s poškozenou geometrií. V takovémto případě by bylo nutné předpočítané stíny zcela odstranit.





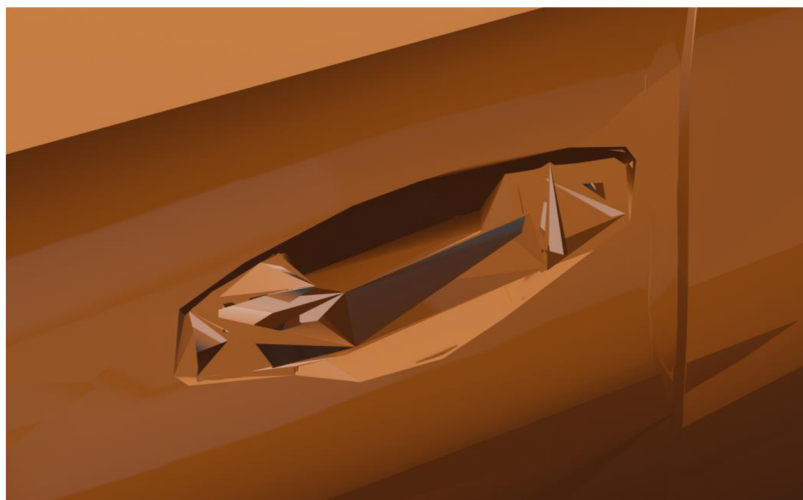
Obrázek 41 Chyby v předpočítaných stínech po decimaci s parametrem -50  
Zdroj: vlastní zpracování

Na tvaru modelu lze pozorovat těžkou deformaci geometrie. Na plochách je velice dobře pozorovatelná trojúhelníková síť. Některé detailnější prvky jsou kvůli deformaci k nepoznání. Vzhledem k deformovanosti modelu a chybějícím stínům je využitelnost takovéto vizualizace k prezentačním účelům nulová. Možné využití si lze představit pouze jako nouzové zobrazení modelu na slabém zařízení.



Obrázek 42 Deformace geometrie předních dveří po decimaci s parametrem -50  
Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 43 je také možné pozorovat, že kromě vyniknutí trojúhelníkové sítě na plochách velkých geometrií jsou menší detailnější geometrie zdeformovány úplně. Algoritmus se pokouší zredukovat trojúhelníky tak moc, že detailní prvky zcela ztrácejí svůj původní tvar. To, co byla prvotně klika předních dveří, jí nyní jen vzdáleně připomíná.



Obrázek 43 Deformace malého prvku – klika při decimaci s parametrem -50

Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 30 Decimace -50

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	93,9 FPS	93,7 FPS	93,7 FPS	93,6 FPS
Přenosná stanice	90,6 FPS	86,9 FPS	62,8 FPS	36,9 FPS
Kancelářský notebook	10,7 FPS	7,34 FPS	5,41 FPS	3,34 FPS

Zdroj: vlastní zpracování

#### 4.5.7 Redukce velikosti souborů

Ve srovnání s optimalizačními funkcemi má decimace trojúhelníků také velký vliv na velikost souborů. Ta primárně ovlivňuje dobu, za kterou se scéna v softwaru načte. Zároveň v případě grafických studií, která pracují s velkým počtem souborů, může touto optimalizací dojít k uvolnění znatelného místa na disku.

Tabulka 31 Redukce velikosti souborů

Decimace	Velikost souboru
Žádná	2 802 MB
-10	2 434 MB
-20	2 059 MB
-30	1 663 MB
-40	1 244 MB
-45	1 023 MB
-50	779 MB

Zdroj: Vlastní zpracování

## 4.6 Kombinace decimace a funkcí

Pro zjištění dopadu kombinace decimace a funkcí na optimalizaci byl zvolen model, který byl zdecimován parametrem -45. Důvodem je, že se jedná o nejnižší počet trojúhelníků s velice nízkou deformací. Tak nízkou, že pokud je prioritou optimalizace a výkon, tak je tyto deformace možné přehlédnout.

Tabulka 32 Decimace -45 a všechny funkce

Anti-aliasing:	1	2	4	8
Pracovní stanice	93,8 FPS	93,8 FPS	93,6 FPS	93,7 FPS
Přenosná stanice	78,2 FPS	63,7 FPS	47,3 FPS	29,2 FPS
Kancelářský notebook	9,03 FPS	6,48 FPS	4,64 FPS	2,75 FPS

Zdroj: vlastní zpracování

## 4.7 Kombinace decimace, funkcí a manuálního umazání geometrií

K optimalizačním krokům z předchozí kapitoly bylo navíc přidáno manuální umazání všech geometrií, které nejsou v testovací animaci vidět. Počet trojúhelníků byl zredukován z 14 151 803 na 9 205 572. Celý proces trval 43 minut. Vzhledem k referencování geometrií je nutné dávat pozor na nechtěné umazání geometrie z viditelné části. Promazán byl exteriér, interiér i oblast motoru a kufru.



Obrázek 44 Přední pohled na automobil po manuálním umazání geometrií

Zdroj: vlastní zpracování

Kvůli komplexnosti modelu a lidskému faktoru je nutné předpokládat, že se nejedná o dokonalé promazání a stále by bylo možné nalézt geometrie, které nejsou vidět. Zásadním nedostatkem této metody je také ztráta interaktivity se scénou. V momentě změny pozorovacího úhlu dochází k odhalení chybějících částí, což je pro vizualizaci nepřípustné.



*Obrázek 45 Zadní pohled na automobil po manuálním umazání geometrií*  
Zdroj: vlastní zpracování

*Tabulka 33 Decimace -45, všechny funkce a manuální umazání geometrií*

<b>Anti-aliasing:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
<b>Pracovní stanice</b>	94 FPS	93,9 FPS	93,7 FPS	93,6 FPS
<b>Přenosná stanice</b>	91,4 FPS	91,3 FPS	70,7 FPS	43,4 FPS
<b>Kancelářský notebook</b>	13,2 FPS	8,74 FPS	6,01 FPS	3,35 FPS

Zdroj: vlastní zpracování

## 5 Zhodnocení a doporučení

Tato závěrečná část diplomové práce je věnována komplexnímu vyhodnocení všech získaných poznatků a dat. S jejichž pomocí byly vyhodnoceny optimalizační možnosti softwaru VRUT a také dopad jednotlivých optimalizačních kroků na náročnost vykreslování. Bylo provedeno rozsáhlé testování a byly využity všechny dostupné znalosti a nástroje s cílem dosáhnout co nejlepší optimalizace poskytnutého modelu. Následně jsou podrobně popsány výsledky testování jednotlivých zařízení z tří výkonnostních kategorií. Dále je uvedena aplikační a časová náročnost optimalizačních kroků z hlediska uživatele a jsou popsány možné chyby, na které se uživatel může během optimalizace setkat, a způsoby, jak se jim vyhnout. Závěrem jsou zde uvedeny minimální hardwarové požadavky vzhledem k určité vykreslovací situaci. A také souhrny naměřených dat pomocí grafů.

### 5.1 Software VRUT z hlediska optimalizace

Z pohledu optimalizace je software VRUT na relativně dobré úrovni. Pro uživatele, kteří jsou obeznámeni s jinými vykreslovacími programy, bude VRUT snadno zvladatelný. Jedním z důvodů pro tuto jednoduchost je možnost přepnutí na ovládací schéma některých z nejpoblárnějších vykreslovacích softwarů. VRUT je inspirován softwarem VRED, což usnadňuje jeho použití pro uživatele s předchozími zkušenostmi. Pro optimalizaci využívá VRUT modul optimize, který obsahuje všechny nástroje potřebné pro optimalizaci v automobilovém průmyslu. Pokud by byl program využit pro jiná odvětví, chyběly by zde některé nástroje.

Navzdory přítomnosti všech nezbytných nástrojů není uživatelské rozhraní VRUTu zcela přívětivé. Informace o jednotlivých funkcích jsou k dispozici pouze v omezené míře, pro některé funkce by bylo vhodné přidat rozhraní a výsledky by nemusely být vypisovány pouze do konzole. Momentálně ve verzi 2.2.0 je také nemožné zjistit počet trojúhelníků vybraného dílu a procentuální parametr decimace zredukuje počet trojúhelníků mnohem více, než je uvedeno v parametru. Pokud se však uživatel dokáže přizpůsobit těmto nedostatkům, získá přístup k silnému optimalizačnímu nástroji, který dokáže výrazně snížit vykreslovací náročnost.

## 5.2 Parametr decimace

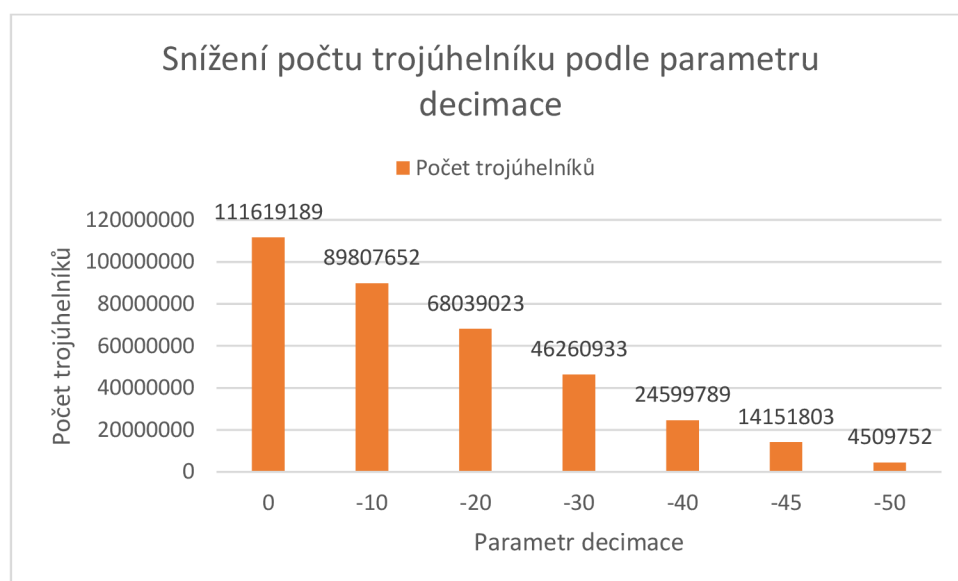
V popisu parametru decimace je popsáno, že parametr odpovídá procentuální hodnotě, o kterou se algoritmus pokusí snížit celkový počet trojúhelníků. Tedy parametr o hodnotě -10 by měl zredukovat počet trojúhelníků o 10 %. Ve skutečnosti se jedná o necelý dvojnásobek a parametr o hodnotě -10 zredukuje počet trojúhelníků o 19,54 %. Pokud by tedy uživatel potřeboval přesnou redukci, tak je s touto anomálií nutné počítat a zadávaný parametr vhodně upravit.

Tabulka 34 Procentuální redukce trojúhelníků podle parametru decimace

Parametr decimace	-10	-20	-30	-40	-45	-50
Procentuální redukce	-19,54 %	-39,04 %	-58,55 %	-77,96 %	-87,32 %	-95,96 %

Zdroj: vlastní zpracování

V grafu 46 je možné pozorovat přesný počet trojúhelníků, na které byl model zredukován při každém parametru decimace.



Obrázek 46 Graf snížení počtu trojúhelníků podle parametru decimace

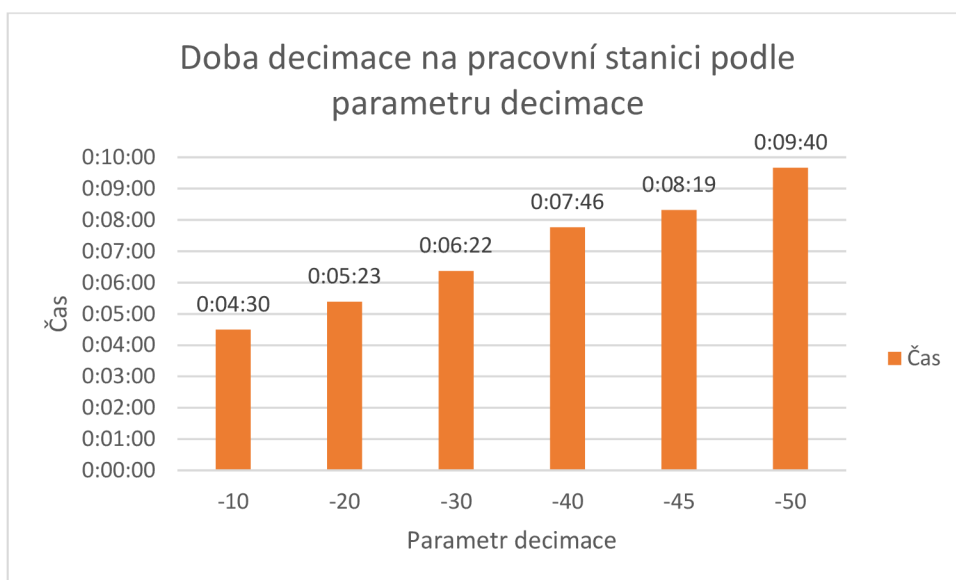
Zdroj: vlastní zpracování

## 5.3 Uživatelská a časová náročnost funkcí

Tuto diplomovou práci je možné využít jako pomocnou příručku, jak si v softwaru VRUT zoptimalizovat model či scénu. Pro začátek procesu optimalizace je nutné otevřít modul optimize a také log konzoli, aby si uživatel mohl přečíst všechny podstatné informace spojené s využitím funkcí. Podle typu a kvality dat mohou mít funkce rozdílný efekt. Model, který byl testován v této

práci, byl již poměrně dobře optimalizován, což mělo za následek, že některé funkce neměly na data žádný efekt. Pokud uživatel potřebuje co nejlepší optimalizaci, tak je možné využít všechny funkce popsané ve čtvrté kapitole a pokud funkce nemá žádný efekt, tak to ničemu nevádí. Je však nutné dávat pozor na to, co funkce dělají, jelikož ve specifických případech mohou mít nežádoucí efekt. Například spojením geometrie je uživatel připraven o možnost přiřazení rozdílného materiálu daným spojeným geometriím. Všechny tyto funkce jsou velice jednoduché na ovládání. Kliknutím na dané tlačítko je funkce spuštěna a i na testovaném kancelářském notebooku je dokončena v rámci několika vteřin. V log konzoli si poté uživatel může přečíst informace o době trvání a provedených změnách.

Jedinou výjimkou je funkce *decimate*, která je výpočetně náročná a značně zatěžuje procesor. Se zvyšující se úrovní decimace stoupá také výpočetní náročnost a čas, za který je operace dokončena. Graf 47 ukazuje, jak dlouho trvala decimace na pracovní stanici v závislosti na zvoleném parametru. Na přenosné pracovní stanici trvala decimace s parametrem -45 o 70 % času déle, tedy 14 minut a 8 vteřin. To je v rámci jednorázové operace stále přijatelný čas. Pro kancelářský notebook byla funkce příliš výpočetně náročná a nepodařilo se jí dokončit. Pokud by tedy uživatel chtěl využít funkci decimace, je doporučeno zkontrolovat výkon procesoru v daném zařízení. Hodnota CPU mark skóre procesoru na webových stránkách [www.cpubenchmark.net](http://www.cpubenchmark.net) by měla být alespoň 12 000 nebo vyšší. To zajistí úspěšné proběhnutí funkce v relativně rychlém čase.



Obrázek 47 Graf trvání decimace na pracovní stanici podle parametru decimace

Zdroj: vlastní zpracování

Pro manuální umazání geometrií jsou nutné základní znalosti ovládní scény a manipulace s řezy. Řezy umožňují prozkoumat všechny skryté geometrie, které by mohly být odstraněny, aniž by měly vliv na konečnou vizualizaci. Odstranění skryté geometrie by nemělo mít žádný vliv na interaktivitu se scénou. Druhou situací je scéna s fixní kamerou bez možnosti interakce. V takovémto případě je možné snížit výpočetní náročnost pomocí odstranění geometrií, které nejsou vidět. Uživatel může využít kamery na protilehlé straně a ručně vybrat geometrie k odstranění. Je vhodné pravidelně kontrolovat, zda nebyly náhodou odstraněny nechtěné geometrie, které jsou viditelné v původní kameře. Jelikož se jedná o destruktivní metodu, je vhodné si data zálohovat a operaci provádět na kopii původních dat.

## 5.4 Možné chyby v procesu optimalizace

Během procesu optimalizace se mohou vyskytnout chyby, které mají negativní dopad na výsledky. Proto je důležité si vždy zálohovat optimalizovaná data, protože většina optimalizačních kroků není vratná a může změnit strukturu a vlastnosti dat. Modul optimize nabízí mnoho funkcí, které umožňují optimalizaci, ale většina z nich je v experimentální fázi a nemusí být plně vyladěné. Mohou způsobit chyby, jako například odstranění důležitých geometrií během zjednodušování struktury scény.

Fáze decimace trojúhelníků je obzvláště náchylná k chybovosti. Čím větší je parametr decimace, tím větší je redukce a zvyšuje se také šance na nechtěné deformace geometrie. Proto je nezbytné po každé decimaci pečlivě zkontrolovat geometrii a nechat software znovu předpočítat stíny. Pokud byla geometrie nevhodně zdecimována, mohou se objevit chyby ve stínech, které lze odstranit pouze smazáním předpočítaných stínů. U malých geometrií, kde se chyby vyskytují nejčastěji, je smazání předpočítaných stínů bez vlivu na finální kvalitu, ale u větších geometrií může mít významný dopad na celkovou vizuální kvalitu.

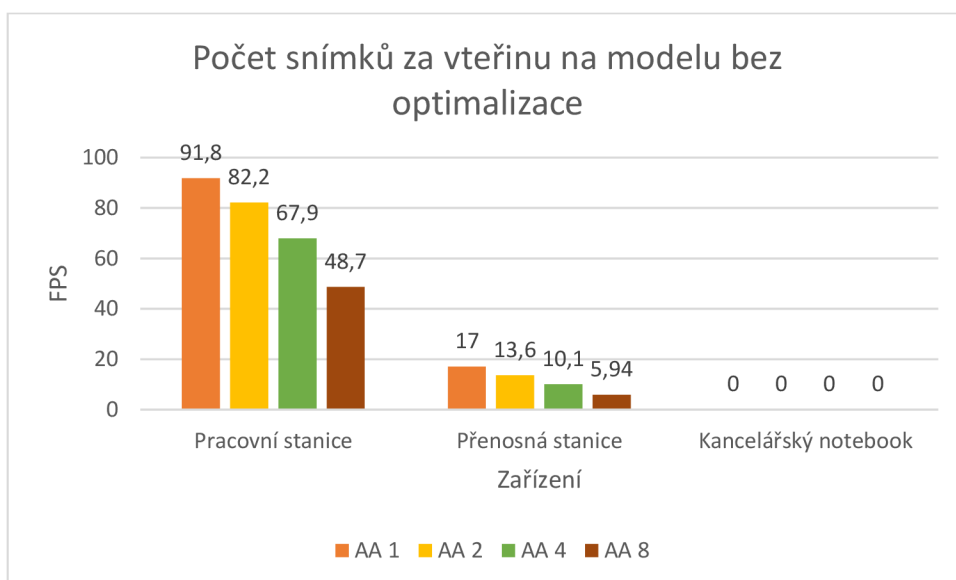
Manuální odstranění geometrií je další fází optimalizace, která vyžaduje trpělivost a preciznost. Při mazání geometrií je nutné neustále kontrolovat, zda nebyla omylem odstraněna geometrie, která je viditelná. Kromě toho je nutné prohlédnout celý model pomocí řezů a najít všechny skryté geometrie. Protože je v tomto procesu velice jednoduché udělat chybu, tak je vhodné postupovat systematicky a s pečlivostí.



## 5.5 Zhodnocení optimalizace

Hlavním praktickým cílem této práce je co nejlépe optimalizovat poskytnutý model a minimalizovat jeho výpočetní náročnost při zachování původní vizuální kvality v softwaru VRUT. Optimalizace je navržena s ohledem pro rendering v oblasti automobilového průmyslu. Model je proto charakteristický vysokou komplexitou s počtem trojúhelníků 111 619 189. Jedná se o mimořádně vysokou hodnotu, která se v běžných situacích v jiných odvětvích nepoužívá. Testování probíhalo na třech zařízeních s různou výkonnostní kategorií. První z nich je pracovní stanice, což je v automobilovém průmyslu standard pro řešení náročných grafických úloh. Druhé zařízení představuje přenosná pracovní stanice s dostatečným výkonem pro méně náročné renderování s výhodou mobility. Posledním zařízením je běžný kancelářský notebook, jehož výkon za normálních okolností nedostačuje pro zpracování takto složitých dat.

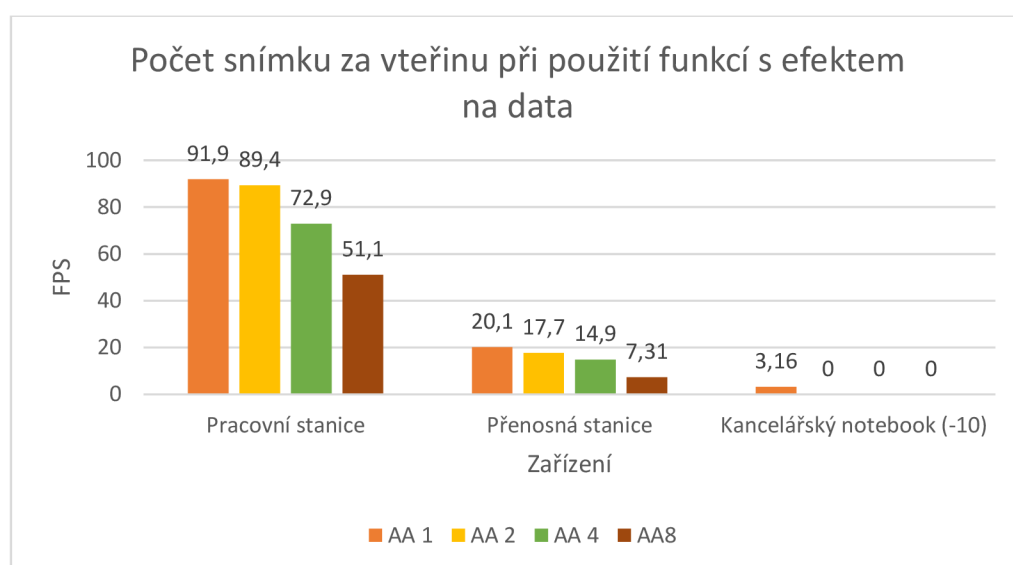
Graf 48 prezentuje výkonnostní limity testovaných zařízení při práci s původními daty. Výkon kancelářského notebooku se ukázal jako nedostačující, neboť data nedokázal ani otevřít. Přenosná pracovní stanice již byla schopna vykreslit animaci, ale nebyla vůbec plynulá vzhledem k nízkému počtu snímků za vteřinu. Pouze pracovní stanice byla schopná dosáhnout plynulého vykreslování, ale při náročnosti anti-aliasingu 8 není 48,7 snímků za vteřinu zcela ideální.



Obrázek 48 Graf počtu snímků za vteřinu na modelu bez optimalizace

Zdroj: vlastní zpracování

Po provedení testování výkonu všech zařízení na modelu bez optimalizace následovala aplikace optimalizačních kroků. Nejprve byly prozkoumány veškeré funkce z modulu optimize a u každé z nich bylo zjištěno, zda má na data nějaký efekt. Pokud ne, byla tato funkce vyřazena z testování, v opačném případě byla individuálně otestována. Bylo zjištěno, že u žádné z individuálních funkcí nebyl pozorován významný vliv na snížení výpočetní náročnosti. Důvodem je kolísání měřených snímků za vteřinu a převážně malý efekt na data. Po aplikaci všech funkcí dohromady byl pozorován malý nárůst snímků za vteřinu. Pro kancelářský notebook bylo nutné využít model s -10 decimací. Pro hodnotu anti-aliasingu 1 zde byl zaznamenán nárůst o 1,16 FPS, nicméně při vyšších hodnotách anti-aliasingu kancelářský notebook stále nedokázal animaci vykreslit.

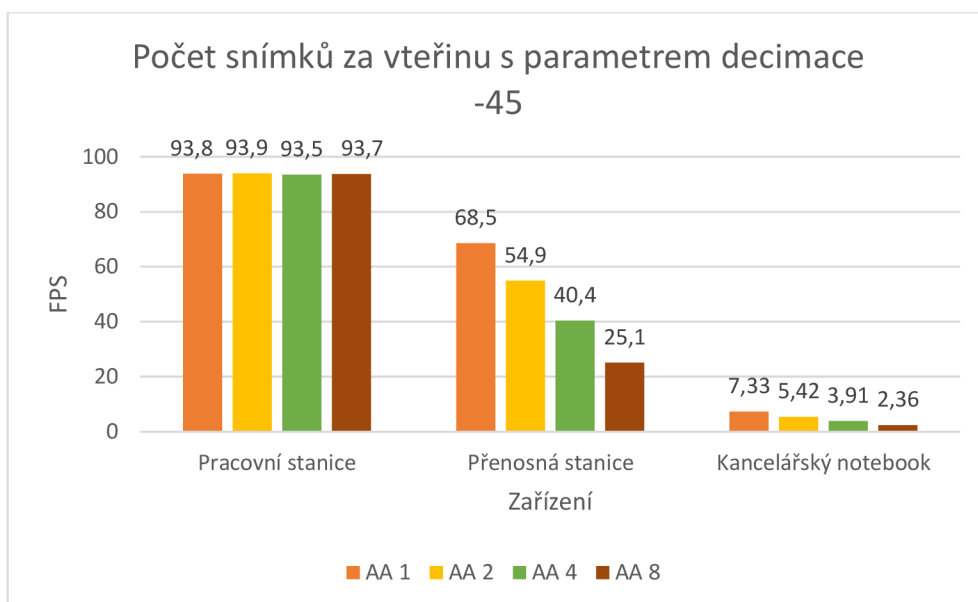


Obrázek 49 Graf počtu snímků za vteřinu po použití funkcí s efektem na data

Zdroj: vlastní zpracování

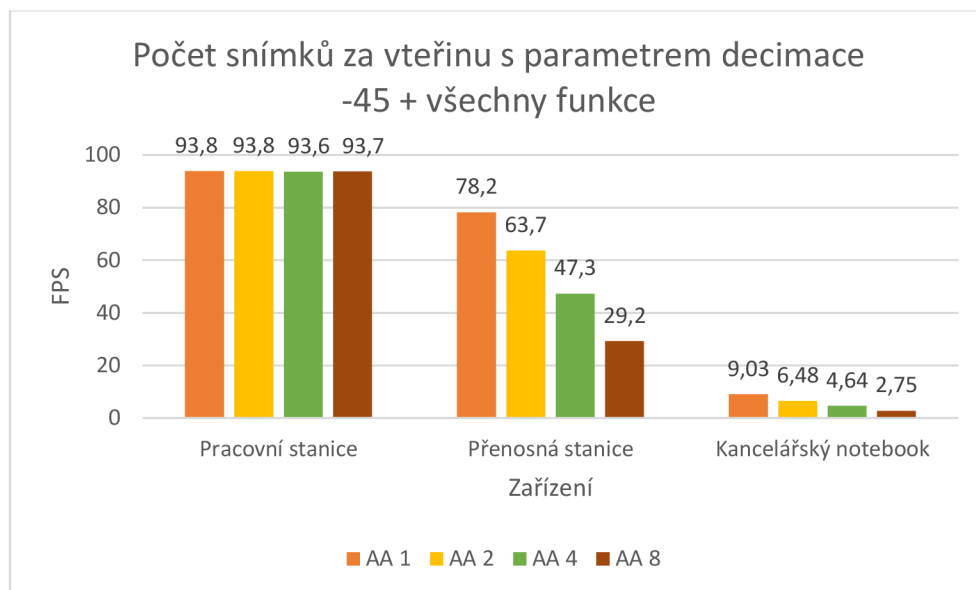
Po otestování vlivu jednotlivých funkcí modulu optimize na výpočetní náročnost následovalo testování decimace trojúhelníků s různými parametry. Parametr -10 byl zvolen jako defaultní úroveň decimace, ale postupně byl zvyšován, aby byl sledován celkový vliv na výpočetní náročnost. Během testování byla sledována délka procesu, počet zredukovaných trojúhelníků a vizuální deformace sítě, která se objevuje s rostoucí úrovní decimace. Nicméně bylo stanoveno, že model by měl zůstat vizuálně stejný jako před optimalizací. Maximální přijatelný parametr decimace byl stanoven na -45, protože při této úrovni byla pozorovatelná pouze lehká deformace. Ta je viditelná pouze tehdy, když jí pozorovatel aktivně hledá. Přínos zvýšení snímků za vteřinu při této úrovni decimace převažoval nad malým zhoršením vizuální kvality. Pro získání dalších informací o dopadu na výkon byl testován také parametr -50, ale tato úroveň decimace měla tak velký vliv na integritu modelu, že je jeho využití pro vizualizaci minimální.

Z grafu 50 je patrné, že na pracovní stanici se při všech úrovních anti-aliasingu vyskytují hodnoty snímků za vteřinu těsně pod hranicí 94. Tato hodnota se ukázala jako maximum, kterého je možné dosáhnout při vykreslování skrz Vulcan v softwaru VRUT. Pokud vezmeme v potaz výkyvy průměrných snímků za vteřinu, lze považovat hodnoty v rozmezí 93,5 až 94 za maximální dosažitelnou snímkovou frekvenci. Toto maximum bylo na pracovní stanici dosaženo při nejméně náročném anti-aliasingu s hodnotou 1 při parametru decimace -20. Výpočetně nejnáročnější anti-aliasing hodnoty 8 poté dosáhl maximální snímkové frekvence právě na decimaci parametru -45. Porovnání výsledků s modelem bez optimalizace ukázalo, že přenosná pracovní stanice dosahuje až čtyřikrát větší snímkové frekvence napříč všemi hodnotami anti-aliasingu. Dokonce i kancelářský notebook dokázal vykreslit animaci napříč všemi hodnotami, i když původně nebyl schopen data ani otevřít.



Obrázek 50 Graf počtu snímků za vteřinu po použití decimace s parametrem -45  
Zdroj: vlastní zpracování

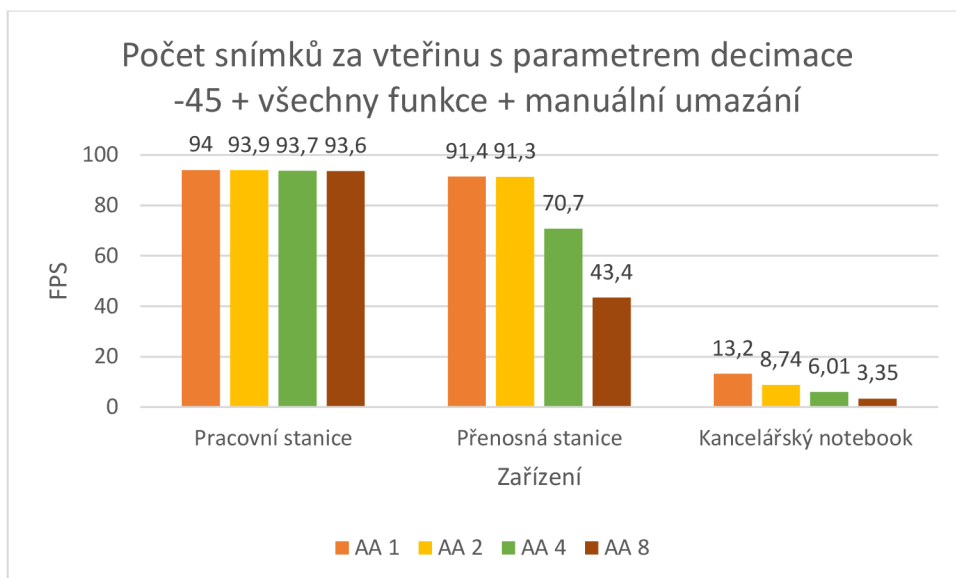
V této fázi následoval klíčový krok finální optimalizace pro interaktivní scénu. Za tímto účelem byl využit model, jenž byl předem decimován s použitím parametru -45. Následně na něj byly aplikovány všechny dostupné funkce s efektem na data. Během aplikace funkcí nebyly pozorovány žádné změny a výsledky získané z této fáze byly totožné s těmi, které byly obdrženy během předchozích testů. Aplikace funkcí na decimovaný model však měla výraznější zvětšení snímků za vteřinu ve srovnání s aplikací na model bez decimace. Při anti-aliasingu hodnoty 1 se na přenosné pracovní stanici zvedlo FPS o 9,7 místo 3,1 a na kancelářském notebooku o 1,7 místo 1,16.



*Obrázek 51 Graf počtu snímku za vteřinu po použití decimace s parametrem -45 + všechny funkce*  
Zdroj: vlastní zpracování

Posledním krokem bylo vyzkoušení optimalizace pro scénu s pevnou kamerou a bez možnosti interaktivity. K již provedené finální optimalizaci bylo nutné přidat manuální odstranění geometrie, která není během vizualizace zobrazena. Toto má za následek snížení počtu trojúhelníků, ale také celkový počet geometrií, materiálů, textur a dalších prvků scény. To ovlivňuje průměrné snímky za vteřinu mnohem více než pouhá decimace trojúhelníků, jak by se na první pohled mohlo zdát. V automobilovém průmyslu je běžným standardem plně interaktivní scéna, a proto by takto radikální optimalizace pomocí odstranění geometrií byla za normálních okolností využita jen výjimečně.

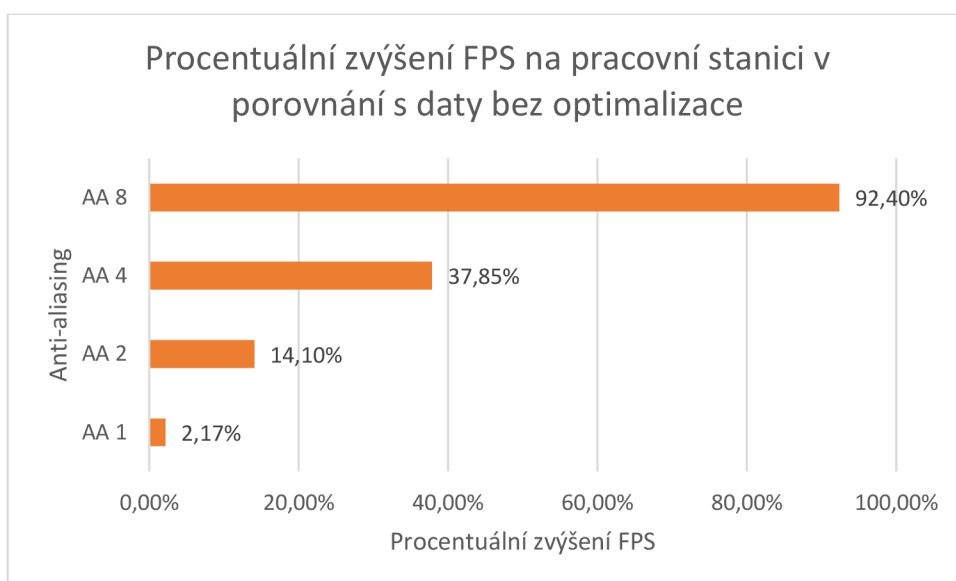
Přidání manuálního odstranění geometrií vedlo k výraznému zlepšení snímkové frekvence při vizualizaci na přenosné pracovní stanici. Při nastavení anti-aliasingu na hodnoty 1 a 2 se téměř dosáhlo maximálního počtu snímků za vteřinu a i při hodnotách 4 a 8 byl pozorován značný nárůst výkonu. Na kancelářském notebooku byla dosažena nejvyšší naměřená snímková frekvence, avšak ani při nejméně náročném anti-aliasingu hodnoty 1 nebyla dosaženo hladké animace. Z grafu 52 lze však stále pozorovat výrazný skok hodnot.



Obrázek 52 Graf počtu snímku za vteřinu po použití decimace s parametrem -45 + všechny funkce + manuální umazání

Zdroj: vlastní zpracování

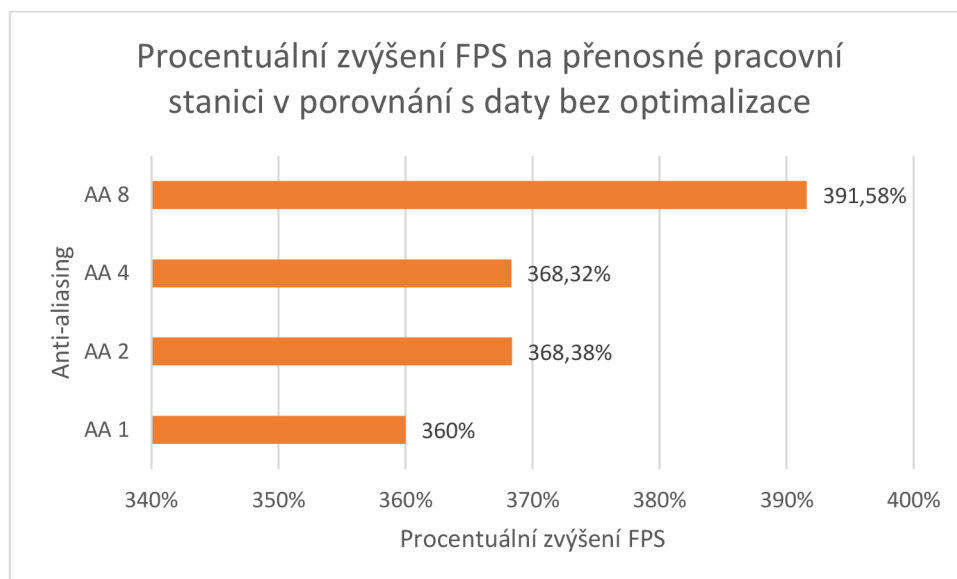
Následující grafy znázorňují procentuální nárůst počtu snímků za vteřinu, dosažených maximální optimalizací pro interaktivní scénu. Tento nárůst byl zjišťován v porovnání s daty bez optimalizace, případně s daty, kdy zařízení bylo schopno animaci vykreslit. Jak ukazuje graf 53, u pracovní stanice nebyl nárůst tak výrazný. Důvodem je maximální FPS animace, které je omezeno na 94 a tato hranice byla dosažena již v průběhu decimace. Pokud by tato maximální hranice neexistovala, výsledky by byly podobnější těm z přenosné pracovní stanice a nárůst počtu snímků za vteřinu by byl po optimalizaci mnohonásobně větší.



Obrázek 53 Procentuální zvýšení FPS na pracovní stanici v porovnání s daty bez optimalizace

Zdroj: vlastní zpracování

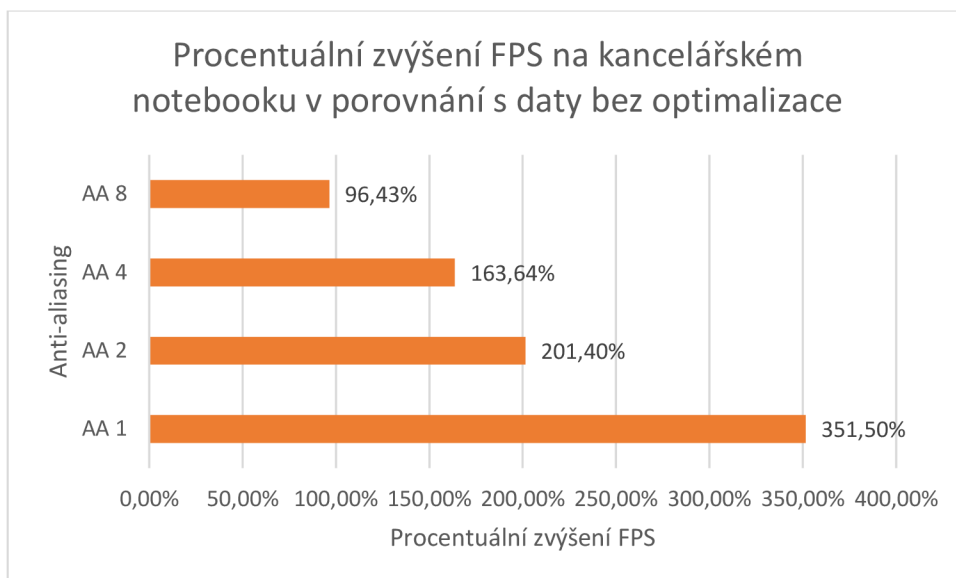
Graf 54 perfektně ukazuje procentuální nárůst FPS po provedení optimalizace na přenosné pracovní stanici. A to z důvodu, že při vykreslování optimalizovaných dat nedošlo k dosažení maximální hranice FPS a zároveň byla stanice schopna vykreslit všechny animace na původních datech. Konkrétně, při použití hodnoty anti-aliasingu 1 došlo k nárůstu FPS o 360 %. Při použití hodnot 2 a 4 došlo k nárůstu o 368 % a u nejnáročnější hodnoty 8 došlo dokonce k nárůstu o 391 %. Tento graf nejlépe ilustruje optimalizační možnosti softwaru VRUT a jeho optimalizačních nástrojů, které dokázaly znatelně snížit výpočetní náročnost a zvýšit FPS.



*Obrázek 54 Procentuální zvýšení FPS na přenosné pracovní stanici v porovnání s daty bez optimalizace*

Zdroj: vlastní zpracování

Graf 55 předvádí procentuální nárůst FPS na kancelářském notebooku. Kromě hodnoty anti-aliasingu 1, kde došlo k nárůstu FPS o 351 %, je nárůst na dalších hodnotách markantně nižší. Příčinou je stav modelu, kdy zařízení bylo schopné animaci vykreslit. Čím později bylo vykonáno decimování dat a následná optimalizace, tím menší byl rozdíl mezi načtenými daty a finální optimalizovanou verzí. To se odráží v menším nárůstu snímkové frekvence. Pro hodnotu anti-aliasingu 1 bylo nutné decimovat s parametrem -10, pro hodnoty 2 a 4 s parametrem -20 a pro hodnotu 8 až s parametrem -30. Grafy ze všech měření jsou k dispozici v příloze práce.



*Obrázek 55 Procentuální zvýšení FPS na kancelářském notebooku v porovnání s daty bez optimalizace*

Zdroj: vlastní zpracování

## 5.6 Doporučení

Renderování pomocí grafického API Vulkan nedokáže plně využít potenciál výkonu testované pracovní stanice, a proto v tomto případě tak velký výkon není vůbec nutný. Taková úroveň optimalizace a výpočetního výkonu by byla vhodná až při renderingu v režimu ray tracingu. Přenosná pracovní stanice byla ukázána jako poměrně vhodná pro takto náročné vykreslování. Ačkoli data bez optimalizace nedokázala vykreslit v reálném čase plynule, s nejlepší hodnotou 17 FPS, tak po kompletní optimalizaci se dostáváme na dobré hodnoty. Při hodnotách anti-aliasingu 1 a 2 jsou FPS nad hodnotou 60, což je bráno jako standard plynulosti u počítačových her. Dokonce i při úrovni 8 jsou FPS těsně pod hodnotou 30, což je hodnota plynulosti, kterou si při určitém nastavení udržují herní konzole. Na druhé straně, kancelářský notebook se ukázal jako nedostačující pro takto náročné úkoly. Ani při kompletní optimalizaci při nejméně náročném anti-aliasingu se FPS nedokázaly dostat na hodnotu 24, což je obecně bráno jako minimální hodnota snímků, aby animace působila plynule. Důvodem je nedostačující výkon hlavně grafické karty, která je v notebooku integrovaná, což je hlavní nedostatek. Proto je doporučeno, aby G3D skóre grafické karty na webových stránkách [www.videocardbenchmark.net](http://www.videocardbenchmark.net) dosahovalo alespoň hodnoty 8000 a vyšší. Nejvhodnější jsou grafické karty pro pracovní stanice, tedy řada Quadro nebo RTX A od společnosti Nvidia a řada PRO od společnosti AMD.

## Závěr

Teoretická část této diplomové práce poskytuje čtenáři ucelený přehled o problematice 3D renderingu a jeho možné optimalizaci. V úvodu práce byly představeny nejvýznamnější softwary pro 3D vizualizace, jejich klady, zápory a cena. Vzhledem k širokému spektru nabízených funkcí a specifických požadavků projektů je zásadní vhodně zvolit použitý software pro konkrétní účel. Další část práce se věnuje popisu nejvýznamnějších odvětví, v nichž se 3D rendering využívá, a specifických nároků, které tyto odvětví na kvalitu vizualizace kladou. Díky této analýze se mohou čtenáři snadno rozhodnout, které optimalizační techniky a nástroje jsou pro jejich projekt nejvhodnější. V následující části práce byly podrobněji popsány moderní optimalizační techniky a postupy, které mohou být použity k maximalizaci kvality a efektivity 3D renderingu. Tyto techniky zahrnují například komprimaci dat, přizpůsobení kvality renderování požadavkům projektu a optimalizaci modelu či osvětlení.

V praktické části této diplomové práce byl proveden rozsáhlý optimalizační proces na velmi náročném modelu, který je specifický pro automobilový průmysl. Tento proces byl proveden na třech různých zařízeních s různým výkonem, aby bylo možné porovnat a vyhodnotit účinnost optimalizačních kroků v závislosti na hardwaru. V průběhu optimalizačního procesu byly aplikovány různé techniky a postupy, aby bylo dosaženo co nejlepšího možného výkonu a kvality renderování. Pro nejvýkonnější pracovní stanici bylo zjištěno, že je až příliš výkonná pro použití grafického API Vulkan, což znamená, že takový výkon není pro tuto specifickou úlohu nutný. Na druhé straně, pro přenosnou grafickou stanici bylo zjištěno, že je to ideální zařízení pro práci s takto náročnými daty a optimalizaci této úrovně. Díky použití optimalizačních kroků a technik bylo v jednom případě dosaženo zlepšení FPS až o 391 %, což je v rámci výkonu velice vysoká hodnota. Je to důkazem toho, že správná optimalizace může mít zásadní vliv na výkon a kvalitu renderování. Na kancelářském notebooku bylo zjištěno, že i přes veškerou optimalizaci toto zařízení postrádá dostatečný výkon pro tento typ úloh.

Kromě samotného optimalizačního procesu byly také prozkoumány a popsány různé problémy, se kterými se může uživatel setkat během procesu optimalizace. Byly uvedeny nejčastější chyby, které mohou být způsobeny špatným nastavením nebo nesprávným použitím nástrojů. Dále byly poskytnuty tipy a doporučení, jak se těmto chybám vyhnout a jak optimalizovat výkon renderování. Tento proces optimalizace také ukázal, jak důležité je mít vhodné zařízení pro práci



s náročnými 3D daty. Byly prezentovány doporučené benchmark skóre zařízení, aby uživatelé mohli porovnat hodnoty svého zařízení a dosáhnout co nejlepších výsledků.

Přínosem této práce je popsání kompletního optimalizačního postupu v softwaru VRUT, který doposud nebyl zpracován. Ve společnosti Škoda Auto a.s. začíná VRUT používat čím dál tím více uživatelů, kteří tuto práci mohou použít jako informační podklad k optimalizaci vlastního projektu. Což může ušetřit čas a předejít možným chybám, které jsou v práci popsány. Práce má také potenciál pomoci uživatelům z oblasti 3D grafiky s výběrem vhodného softwarového nástroje a optimalizačních metod pro jejich projekt.

V budoucnu by bylo možné tuto práci rozšířit pro optimalizaci v režimu raytracingu. Zajímavá by také byla optimalizace surových 3D dat, která nebyla žádným způsobem optimalizovaná. Další možností rozšíření by byla optimalizace modelu přímo pro virtuální realitu s plně interaktivním prostředím.

## Seznam použité literatury

ACTIVISION BLIZZARD, 2023. Maxon Redshift Gallery. *Maxon* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.maxon.net/en/gallery/>

ALLGAIER, Philip, 2014. Why are gaming graphics not as beautiful as animated movies?. *Game development* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://gamedev.stackexchange.com/questions/82816/why-are-gaming-graphics-not-as-beautiful-as-animated-movies>

AMLIN, Jared, 2022. Baked, Mixed, Realtime Lighting and Choosing between Static or Dynamic Objects. *Medium* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://jaredamlin.medium.com/baked-mixed-realtime-lighting-and-choosing-between-static-or-dynamic-objects-e28b3aeeb806>

ANMOLMAKER, 2021. SelfCAD - 3D Design Software Review and Features. *3DwithUs* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://3dwithus.com/selfcad-3d-printing-design-software-review/>

AUTODESK INC, 2023. Autodesk. *Autodesk* [online]. San Rafael, California, USA: Autodesk Inc. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/>

AVERSA, Davide a Chris DICKINSON. 2019. *Unity Game Optimization: Enhance and Extend the Performance of All Aspects of Your Unity Games, 3rd Edition*. 3rd ed. Birmingham, England: Packt Publishing. ISBN 9781838556518.

AZZAM, Israa, 2023. Chaos Corona 9. *Corona-renderer* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://corona-renderer.com/>

BAKER, Logan, 2022. What is CGI? How Reality and CGI Blend in Films. *PremiumBeat* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.premiumbeat.com/blog/what-is-cgi-in-film/>

BLENDER FOUNDATION, 2023. Blender. *Blender* [online]. Amsterdam, Netherlands: Blender Foundation [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.blender.org/>

BOTSCH, Mario, Leif KOBELT, Mark PAULY, Pierre ALLIEZ a Bruno LEVY, 2010. *Polygon Mesh Processing*. Natick, MA: A K Peters. ISBN 9781568814261.

CARDOSO, Jamie, 2017. 3D photorealistic rendering: interiors & exteriors with V-Ray and 3ds Max. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-138-78072-9.

CGIFURNITURE, 2021. PRODUCT 3D RENDERING GUIDE. *CGIFurniture* [online]. Montreal, Quebec, Canada: CGIFurniture [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://cgifurniture.com/3d-rendering-guide/>

CLISHAM, Liam, 2022. An Overview of Arnold in Cinema 4D. *School of motion* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://elmtec-sketchup.co.uk/sketchup-a-history/>

COLLINGRIDGE, Peter, 2022. Ask a Pixar Scientist. *The science behind Pixar* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://sciencebehindpixar.org/ask-a-pixar-scientist>

CPUBENCHMARK, 2023. CPU Benchmarks. *PassMark Software* [online]. Sydney, Australia: [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.cpubenchmark.net/>

CROSSBROWSER 3D LLC, 2023. SelfCAD. *SelfCAD* [online]. Brooklyn, New York, USA: Crossbrowser 3D LLC [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.selfcad.com/>

DANNIK, Olga, 2023. Autodesk Maya. *Autodesk* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/maya/>

DENHAM, Thomas, 2022. What is LOD (Level of Detail) in 3D Modeling?. *Concept Art Empire* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://conceptartempire.com/3d-lod-level-of-detail/>

EASYRENDER, 2023. Corona Renderer is the Next Big Thing in 3D Visualization. *EasyRender* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.easyrender.com/a/corona-renderer-is-the-next-big-thing-in-3d-visualization>

EISEMANN, Elmar, Michael SCHWARZ, Ulf ASSARSSON a Michael WIMMER. 2011. Real-Time Shadows. Natick, MA: A K Peters. ISBN 978-1568814384.

ENGEL, Wolfgang, 2016. GPU Pro 7: Advanced Rendering Techniques. New York, NY: Productivity Press. ISBN 978-1498742535.

FREDERICK, Ian, 2023. Maxon Cinema 4D Gallery. *Maxon* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.maxon.net/en/gallery/>

GAME DEV ACADEMY, 2015. 3D Modelling - Level of Detail. *Game Dev Academy* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://docs.google.com/document/d/11zHK9TrmKosn-7bETw5fDx4n11havfpRIKEBkkOESf8>

GARLAND, Ben, 2019. How CGI Has Revolutionised Graphics in Gaming. *MyMemory* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mymemory.co.uk/blog/how-cgi-has-revolutionised-graphics-in-gaming/>

GRAHASVR, 2022. How realistic can Virtual Reality become?. *Grahasvr* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: [https://www.grahasvr.com/blog\\_details.php?id=21](https://www.grahasvr.com/blog_details.php?id=21)

GREGORY, Jason. 2018. Game Engine Architecture, Third Edition. 3rd ed. London, England: CRC Press. ISBN 978-1138035454.

HAGBERG, Staffan, 2022. Real-time 3D rendering - what is it and how does it work?. *Animech* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.animech.com/en/articles/3d-rendering-in-realtime>

HNIN, Thet, 2022. What Is V-Ray And Why Is It Popular Among Architects For Photorealistic Rendering?. *Novatr* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.novatr.com/blog/what-is-vray>

HP INC, 2023. HP Products. *HP* [online]. Palo Alto, California, USA: HP Inc. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.hp.com/>

CHAOS CZECH A.S., 2023. Chaos Corona 9. *Corona-renderer* [online]. Praha, Česká Republika: Chaos Czech a.s [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://corona-renderer.com/>

CHAOS SOFTWARE EOOD, 2023. Chaos V-ray. *Chaos* [online]. Karlsruhe, Germany: Chaos software EOOD [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.chaos.com/>

CHILLINGWORTH, Alec, 2023. The Pros & Cons of Creating 3D Content With Blender Software. *Epidemic Sound* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.epidemicsound.com/blog/blender-software/>

KERLOW, Isaac Victor, 2011. Mistrovství 3D animace: [ovládněte techniky profesionálních filmových tvůrců!]. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-2717-9.

KOPECKÁ, Tereza, 2022. Heard about VRUT?. *Greencode* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.greencode.cz/en-blog/about-vrut>

LEE, Charlotte, 2021. SketchUp a History. *Elmtec* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://elmtec-sketchup.co.uk/sketchup-a-history/>

LUEBKE, David, Martin REDDY, Jonathan D. COHEN, Amitabh VARSHNEY, Benjamin WATSON a Robert HUEBNER, 2003. *Level of Detail for 3D Graphics*. Oxford, England: Morgan Kaufmann. ISBN 978-1-55860-838-2.

MAXON COMPANY GMBH, 2023. Maxon. *Maxon* [online]. Bad Homburg vor der Höhe, Germany: Maxon Company GmbH [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.maxon.net/>

MELINO, Tony, 2023. Product Photography vs CGI. *Mosaic* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mosaic.com/thinking/product-photography-vs-cgi/?lang=en>

MG DESIGN UK, 2020. 3D CGI visualisation services. *MG Design UK* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mgdesignuk.com/3d-cgi-visualisation-services/foods>

MITCHELL, Peter, 2020. What is Architectural Visualisation?. *Business West* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.businesswest.co.uk/blog/what-architectural-visualisation>

MOS, Michal, 2016. Optimizing 3d scenes for faster rendering. *Evermotion* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://evermotion.org/tutorials/show/10105/optimizing-3d-scenes-for-faster-rendering>

NGUYEN, Hubert, 2008. GPU Gems 3. Addison-Wesley Professional. ISBN 9780321515261.

PARKER, Michael a Suhel DHANANI, 2012. Digital Video Processing for Engineers: A Foundation for Embedded Systems Design. London, England: Newnes. ISBN 978-0124157606.

PAUL, Catherine, 2022. Usage of 3D Animation in Architecture: How CG Videos Became Irreplaceable in Architects' Practice. *Architectural CGI* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://archicgi.com/cgi-services/usage-of-3d-animation-in-architecture/>

PHARR, Matt a Greg HUMPHREYS, 2010. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 2nd ed. Oxford, England: Morgan Kaufmann. ISBN 978-0123750792.

RISING SUN PICTURES, 2023. Autodesk Arnold. *Autodesk* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/arnold/>

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2023. Rhinoceros. *Rhinoceros 3D* [online]. Seattle, Washington, USA: Robert McNeel & Associates [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/>

SAHA, Disha, 2022. The Rise of CGI in Films in the 21st Century. *Miracalize Media* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://miracalize.com/rise-of-cgi-in-films/>

SAWANTT, Saili, 2021. What Is Rhinoceros 3D? A 3D Modeling Software Based On NURBS Geometry. *Parametric Architecture* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://parametric-architecture.com/what-is-rhinoceros-3d-a-3d-modeling-software-based-on-nurbs-geometry/>

SHYNIA, T, 2023. Rhinoceros Forums. *Rhinoceros* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://discourse.mcneel.com/c/gallery/>

TRIMBLE INC, 2023. Sketchup industries. *Sketchup* [online]. Westminster, Colorado, USA: Trimble Inc. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.sketchup.com/>

VACCA, Gabriele, 2023. Chaos Interior Design. *Chaos* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.chaos.com/interior-design/>

VERONA, Massimo, 2023. Autodesk 3ds Max. *Autodesk* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/>

VIDEOCARDBENCHMARK, 2023. Videocard Benchmarks. *PassMark Software* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.videocardbenchmark.net/>

WILTSHIRE, Alex, 2022. How many frames per second can the human eye really see?. *PCgamer* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.pcgamer.com/how-many-frames-per-second-can-the-human-eye-really-see/>

ZEMAN, Nicholas Bernhardt, 2015. Essential skills for 3D modeling, rendering, and animation. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis. ISBN 978-1-4822-2412-2.

## Seznam příloh

Příloha A	Kompletní benchmark výsledky .....	104
Příloha B	Grafy z kompletní decimace .....	106

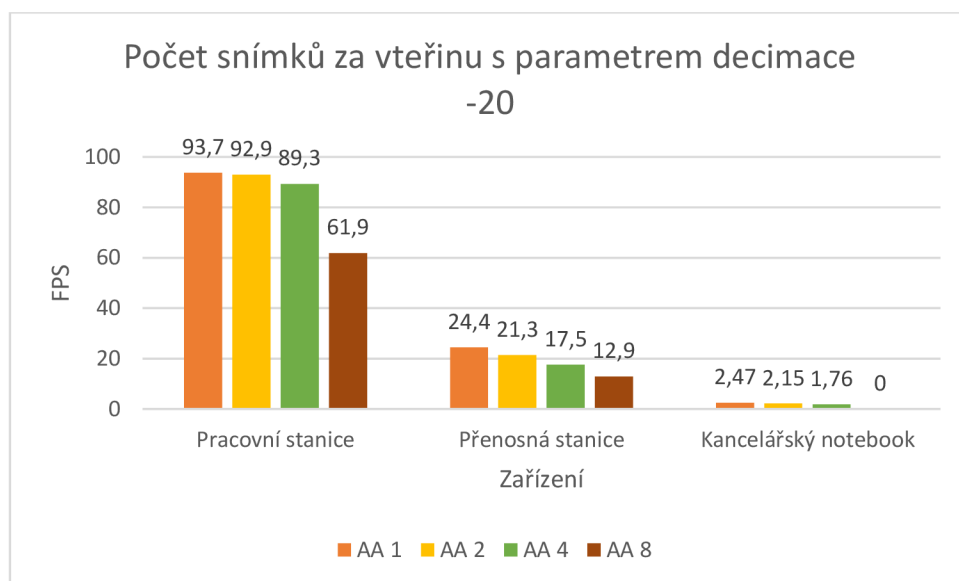
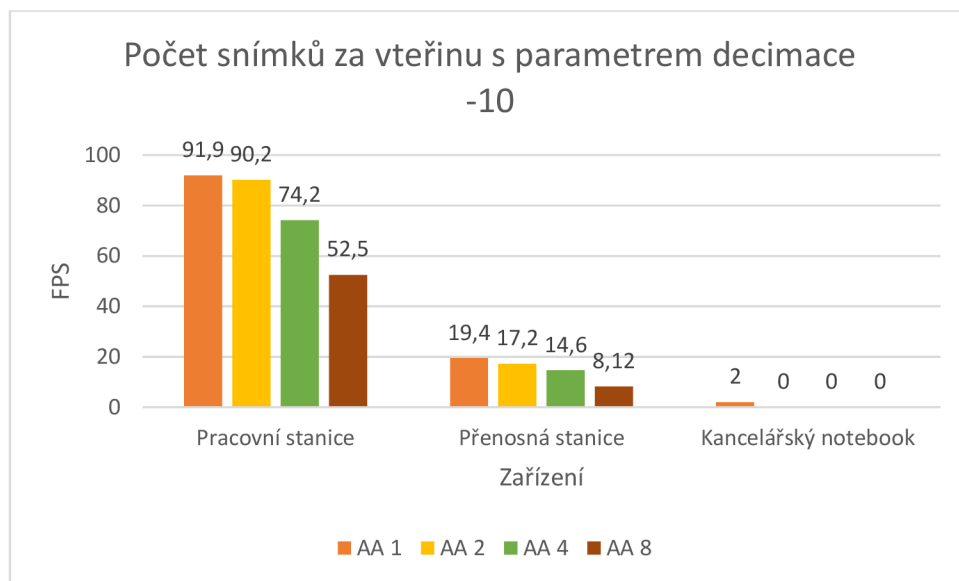
## Příloha A Kompletní benchmark výsledky

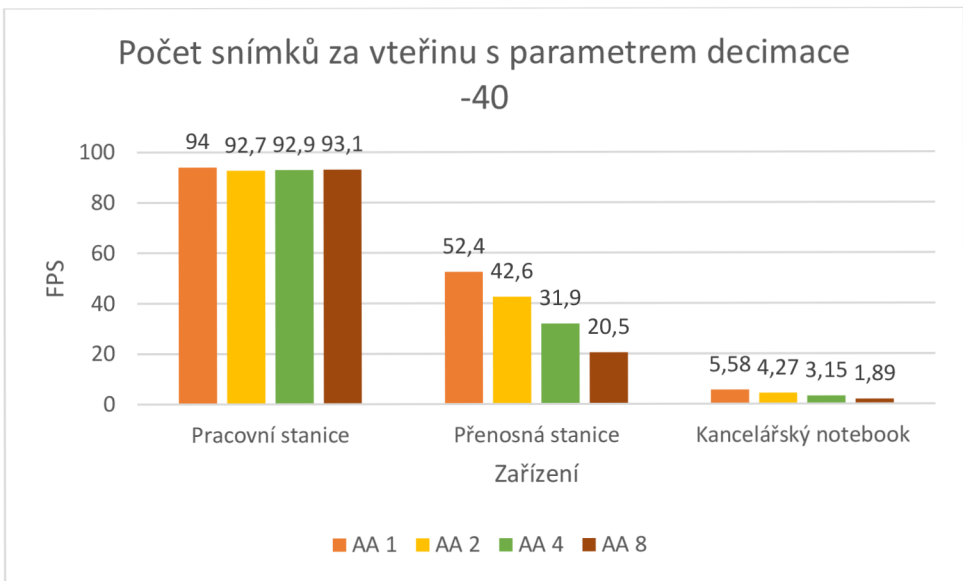
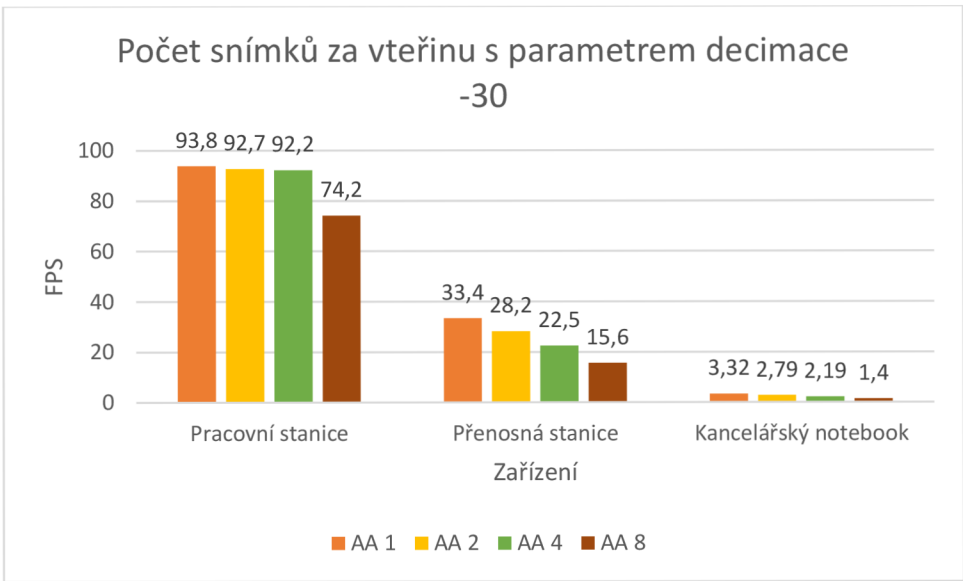
	RTX A6000 <span>x</span>	Quadro T2000 <span>x</span>	Intel UHD Graphics 620 <span>x</span>
Price	\$4669.99 <b>BUY NOW!</b>	\$528.35 <sup>1</sup>	<a href="#">Search Online</a>
Bus Interface	PCIe 4.0 x16	NA <sup>2</sup>	Integrated
GPU Class	Workstation	Mobile	Desktop
Core Clock	1410 MHz	NA <sup>2</sup>	300 MHz
Memory Clock	16000 MHz	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>
Maximum Memory Supported	49152 MB	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>
DirectX	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>	12.0
OpenGL	4.6	NA <sup>2</sup>	4.4
Max TDP	300W	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>
First Seen on Chart	Q1 2021	Q2 2019	Q2 2017
# of Samples	152	532	16165
<b>Average Results (% diff. to max in group)</b>			
DirectX 9	230 FPS (998.9%)	122 FPS (485.2%)	21 FPS
DirectX 10	320 FPS (4352.6%)	69 FPS (856.9%)	7 FPS
DirectX 11	459 FPS (2219.4%)	128 FPS (546.6%)	20 FPS
DirectX 12	91 FPS (1885.7%)	31 FPS (582.5%)	5 FPS
GPU Compute	15599 Ops/Sec (787.0%)	2915 Ops/Sec (65.8%)	1759 Ops/Sec
G2D Rating	885	470 (-46.9%)	245 (-72.4%)
G3D Rating	<b>22607</b>	<b>7174</b> (-68.3%)	<b>1036</b> (-95.4%)



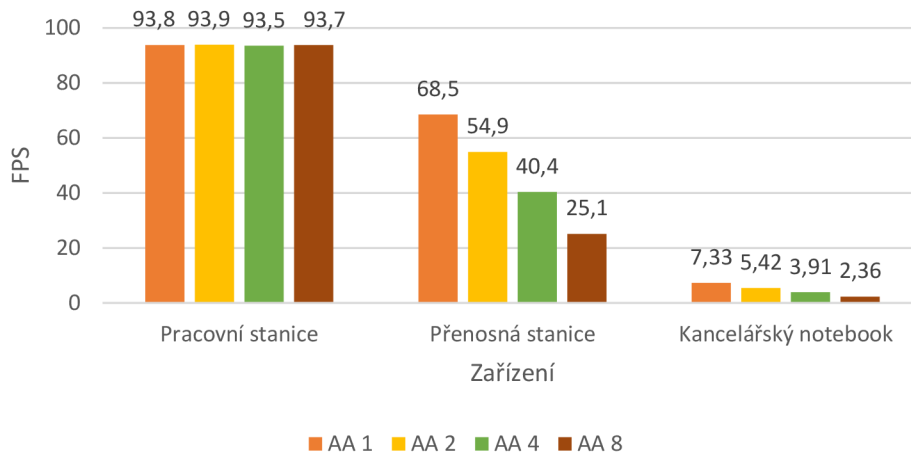
	Intel Xeon Gold 6230 @ 2.10GHz	Intel Core i7-10850H @ 2.70GHz	Intel Core i5-8365U @ 1.60GHz
Price	\$1297.7 - BUY	Search Online	Search Online
Socket Type	FCLGA3647	FCBGA1440	FCBGA1528
CPU Class	Server	Laptop	Laptop
Clockspeed	2.1 GHz	2.7 GHz	1.6 GHz
Turbo Speed	Up to 3.9 GHz	Up to 5.1 GHz	Up to 4.1 GHz
# of Physical Cores	20 (Threads: 40)	6 (Threads: 12)	4 (Threads: 8)
Cache	L1: 1,024KB, L2: 16.0MB, L3: 28MB	L1: 256KB, L2: 1.0MB, L3: 12MB	L1: 256KB, L2: 1.0MB, L3: 6MB
Max TDP	125W	45W	15W
Yearly Running Cost	\$22.81	\$8.21	\$2.74
Other		Intel UHD Graphics	Intel UHD Graphics 620
First Seen on Chart	Q2 2019	Q2 2020	Q2 2019
# of Samples	7	399	510
CPU Value	20.7	30.3	11.6
Single Thread Rating (% diff. to max in group)	2268 <i>(-16.4%)</i>	2714 <i>(0.0%)</i>	2178 <i>(-19.7%)</i>
CPU Mark (% diff. to max in group)	<b>26888</b> <i>(0.0%)</i>	<b>11983</b> <i>(-55.4%)</i>	<b>6257</b> <i>(-76.7%)</i>

## Příloha B Grafy z kompletní decimace





Počet snímků za vteřinu s parametrem decimace  
-45



Počet snímků za vteřinu s parametrem decimace  
-50

