



## MATURITNÍ PRÁCE

Programování grafické aplikace v C++

René Čakan

vedoucí práce: Dr. rer. nat. Michal Kočer

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s vyznačením všech použitých pramenů.

V Českých Budějovicích dne ..... podpis .....

René Čakan

# Abstrakt

## Klíčová slova

## Poděkování

# Obsah

Úvod	1
<b>I Teorie k vývoji hry v OpenGL</b>	<b>2</b>
<b>1 Programovací jazyky</b>	<b>3</b>
1.1 Programovací jazyk C . . . . .	3
1.2 Programovací jazyk C++ . . . . .	4
<b>2 Počítačová grafika</b>	<b>7</b>
2.1 Historie počítačové grafiky . . . . .	7
2.2 Grafické karty . . . . .	11
2.2.1 CPU vs. GPU . . . . .	11
2.2.2 Architektura a paměťová hierarchie GPU . . . . .	12
2.2.3 Paralelismus . . . . .	13
2.3 Grafická pipeline . . . . .	15
2.4 Transformace a lineární algebra . . . . .	15
<b>3 OpenGL</b>	<b>16</b>
3.1 Historie OpenGL . . . . .	16
3.2 OpenGL pipeline . . . . .	16
3.3 Shadery . . . . .	16
3.4 Textury . . . . .	16
<b>4 to do</b>	<b>17</b>

<b>II</b>	<b>Vývoj hry v OpenGL</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Grafika a zvuk</b>	<b>19</b>
5.1	Aseprite . . . . .	19
5.2	Bosca Ceoil . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Použité knihovny</b>	<b>20</b>
6.1	GLAD . . . . .	20
6.2	GLFW . . . . .	20
6.3	stb_image . . . . .	20
<b>7</b>	<b>Herní scény</b>	<b>21</b>
7.1	Scéna hlavního menu . . . . .	21
7.2	Scéna pozastavené hry . . . . .	21
7.3	Scéna hry . . . . .	21
<b>8</b>	<b>Herní mechaniky</b>	<b>22</b>
8.1	Generování objektů . . . . .	22
8.2	Pohyb hráče . . . . .	22
8.3	Detekce kolize . . . . .	22
	<b>Závěr</b>	<b>23</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>28</b>
	<b>Zkratky</b>	<b>29</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>32</b>
<b>A</b>	<b>Fotky z pokusů</b>	<b>33</b>
<b>B</b>	<b>Příloha další</b>	<b>34</b>

# Úvod

# Část I

## Teorie k vývoji hry v OpenGL



# 1 Programovací jazyky

## 1.1 Programovací jazyk C

C je středněúrovňový programovací jazyk, tedy jazyk, který je podobou blízko strojovému kódu, ale má už prvky vyššího programovacího jazyka jako jsou funkce, datové struktury nebo to že je strukturovaný. Je kompilovaný a statický, což znamená, že se program musí nejdříve přeložit do strojového kódu a až pak se může spustit. Datové typy jsou známy v čase kompilace, proto všechny proměnné musí být v kódu deklarovány, jelikož vkládání vstupních dat do programu probíhá až při běhu programu. Programuje se v něm strukturovaně a procedurálně, tedy kód se píše pomocí řídicích struktur (if, while, for atd.) a pomocí funkcí, které umožňují používat části kódu vícekrát. C nemá automatický správce paměti, takže je potřeba uvolňovat paměť manuálně. C má strídrou standardní knihovnu, která obsahuje základní matematické operace a funkce pro práci s pamětí a soubory, takže jakékoliv složitější datové struktury či funkce si člověk musí naprogramovat sám. Tato strohost a blízkost ke strojovému kódu z C dělá jeden z nejrychlejších programovacích jazyků. [25, 23, 15, 32, 34]

C bylo vytvořeno Dennisem Ritchiem na počátku 70. let 20. století v AT&T Bell Labs. Jeho předchůdci byly jazyky ALGOL, CPL, BCPL a B. Jeho prvotním účelem bylo přepsat operační systém UNIX do použitelnějšího jazyka než Assembly a B. Už koncem 70. let bylo C populární, ale nebylo standardizované a vznikalo mnoho různých variant. Na začátku 80. let tedy American National Standards Institute (ANSI) zahájil práci na formální standardizované verzi. Tu dokončili v roce 1989 a je známa pod jménem C89. V průběhu let vycházely další verze, které jazyk zlepšovaly a modernizovali. Nejdůležitější verze byly C99, C11 a C17. Norma C23 byla nedávno schválena a teď se implementuje do kompilátorů. V současnosti mezi nejpoužívanější kompilátory patří GCC, Clang a MSVC. Jelikož bylo C velice populární, ovlivnilo řadu jiných programovacích jazyků, jako C#, Java, Rust, Go atd. [4, 18, 25, 23]

C je univerzální programovací jazyk, má tedy širokou škálu využití. Jeho první využití

bylo k napsání UNIXu, který později ovlivnil operační systémy jako Linux, macOS, iOS a Android. Používá se v programování softwaru s omezenou pamětí a výkonem, jako je firmware aut či v zařízeních chytrých domácností. Dále se využívá pro tvoření kompilátorů a interpreterů jako je GCC nebo interpreter Pythonu. Také jsou v něm napsané systémové databáze MySQL a Oracle Database. Kvůli jeho rychlosti jsou v něm napsané knihovny pro jiné programovací jazyky jako je NumPy, OpenGL či GLFW. [4, 25, 47]

Jednoduchý program, který načte ze vstupu počet čísel, která chce uživatel seřadit. Následně daná čísla načte a vytiskne je seřazená:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int compare(const void *a, const void *b)
5 {
6     return (*(int *)a - *(int *)b);
7 }
8
9 int main(void)
10 {
11     int sizeOfArray;
12     scanf("%d", &sizeOfArray);
13     int *array = malloc(sizeOfArray * sizeof(int));
14
15     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
16         scanf("%d", &array[i]);
17
18     qsort(array, sizeOfArray, sizeof(int), compare);
19
20     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
21         printf("%d\n", array[i]);
22
23     free(array);
24     return 0;
25 }
```

Zdrojový kód 1.1: sort\_n\_numbers.c

## 1.2 Programovací jazyk C++

Programovací jazyk C++ je v mnoha ohledech podobný jazyku C. Je stejně jako C středně-úrovňový, kompilovaný, statický, má datové typy známé v době kompilace a nemá au-

tomatický správce paměti. V C++ se také programuje strukturovaně a procedurálně, ale na rozdíl od C, také umožňuje programovat objekově. Objektové programování umožňuje používat objekty, které jsou instance tříd. Tyto třídy umožňují dědičnost, polymorfismus a zapouzdření, což dělá kód přehlednější a usnadňuje budoucí rozšiřování a debuggování. Dalším rozdílem je standardní knihovna, kterou má C++ rozsáhlejší. Obsahuje nové kontejnery jako vector, map, a priority\_queue, které jsou tvořeny pokročilejšími datovými strukturami jako binární vyhledávací strom nebo heap. Dále obsahuje nové algoritmy, například sort, find nebo count. Kvůli velké podobnosti C a C++ se často může C kód používat v C++, ale není tomu tak vždy. Například tento kód:

```
1 | int class(int new, int bool);
```

Zdrojový kód 1.2: incompatibility\_example.c

V C tento kód vytvoří funkci class, která vrací int a má dva parametry new a bool. V C++ jsou ale class, new a bool klíčová slova, která nelze použít v názvu proměnných a funkcí. Pokud chce programátor napsat C kód, který se bude jednoduše v C++ programech, doporučuje se programovat v C tak, aby daný C kód byl podmnožinou C++. [46, 45]

C++ bylo vytvořeno Bjarnem Stroustrupem v roce 1979 v AT&T Bell Labs. Před vytvořením C++ pracoval Stroustrup s programovacím jazykem Simula 67, který byl objekově orientovaný a sloužil primárně k vytváření simulací. Stroustrupovi přišlo objekově orientované programování velmi užitečné, ale Simula 67 byl příliš pomalý pro větší projekty. Rozhodl se vytvořit nadmnožinu jazyka C, která by umožňovala objekově orientované programování a zároveň si zachoval rychlost C, s názvem C with Classes. V roce 1982 byl Stroustrup se stavem C with Classes zklamán. Nepřišlo mu, že oproti C přináší významné zlepšení a rozhodl se jazyk dále vylepšovat nad rámec objekově orientovaného programování. V roce 1983 byl jazyk přejmenován z C with Classes na C++. Dále bylo C++ v roce 1985 oficiálně vydáno a začalo se používat komerčně. V roce 1998 byla vydána první standardizovaná verze s jménem C++98. Další významné verze, které jazyk modernizovaly a přidávaly mu nové funkce, byly C++03, C++11, C++14, C++17, C++20 a nejnovější verze C++23. C++ se kompiluje pomocí stejných kompilátorů jako C, tedy GCC, Clang a MSVC. [45, 44, 3, 51]

C++ je stejně jako C univerzální programovací jazyk, a využívá se v široké škále odvětví. První využití je ve videoherním průmyslu. V C++ jsou napsané populární hrací enginy jako Unity nebo Unreal Engine. Dále se v něm vytváří aplikace jako Photoshop nebo Blen-

der. Využívá se v částech operačních systémů jako Apple macOS nebo Microsoft Windows OS. Dále se využívá při vytváření internetových prohlížečů, například Firefox nebo Google Chrome. C++ se využívá i ve vědě, například v CERNu nebo v NASA. [46, 16, 43]

Program se stejnou funkcí jako z kapitoli o C, ale napsán v C++

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3 #include <algorithm>
4
5 int main()
6 {
7     int sizeOfArray;
8     std::cin >> sizeOfArray;
9     std::vector<int> arr(sizeOfArray);
10
11     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
12         std::cin >> arr[i];
13
14     std::sort(arr.begin(), arr.end());
15
16     for(int i : arr)
17         std::cout << i << '\n';
18
19     return 0;
20 }
```

Zdrojový kód 1.3: sort\_n\_numbers.cpp

## 2 Počítačová grafika

### 2.1 Historie počítačové grafiky

Není úplně jasné, který počítač jako první využíval počítačovou grafiku, ale začnu počítačem Small-Scale Experimental Machine (SSEM). Tento počítač byl vytvořen v roce 1948 na Manchesterské univerzitě a jeho tvůrci byli Frederic C. Williams, Tom Kilburn a Geoff Tootill. Tento počítač byl první počítač s uloženým programem, tedy počítač, který měl svůj program uložen ve stejné paměti jako data, se kterými počítač pracoval. Data uchovával na katodové trubici (CRT), které se později začalo říkat Williamsova trubice. Tato trubice si dokázala pamatovat až 2048 bitů, které byly uchovávány jako elektrické náboje. Součástí trubice byl i displej, který na svém fosforovém povrchu promítal oblasti s nábojem. Takto vznikl první počítač s digitálním displejem. [38, 33]

Dalším zajímavým počítačem byl Whirlwind. Americký Office of Naval Research a U.S. Air Force chtěli vytvořit počítač, ve kterém by dokázal běžet letecký simulátor. Tak tedy v roce 1947 začal Jay Forrester pracovat v laboratořích MIT na projektu Whirlwind. Při práci vyvinul Forrester paměť s náhodným přístupem (RAM), tvořenou magnetickými jádry, skrz které proudil koincidenční proud. Počítač byl dokončen v roce 1951. Využíval CRT na zobrazování výsledků podobně jako SSEM a dokázal na svém displeji řešit rovnice, později i simulovat karetní hru blackjack. Následně se projekt Whirlwind stal součástí projektu Semi-Automatic Ground Environment (SAGE). Ten měl za úkol vytvořit počítačový systém, který by pomocí radarů dokázal odhalovat letadla a řídit obranné síly proti případným letadlům. Projekt SAGE byl jeden z prvních systémů, které využívaly interaktivní ovládání pomocí klávesnice či speciálního světelného pera. Pokud bylo perem namířeno na ikonu letadla, zachytilo světlo z displeje a počítač zobrazil informace o daném letadle jako rychlost a směr jeho letu. Další počítač, který navazoval na projekt Whirlwind a SAGE, byl počítač TX-2, který byl vytvořen Wesem Clarkem na MIT. Ten byl na rozdíl od Whirlwindu tranzisto-



Obrázek 2.1: Sketchpad Ivana Sutherlanda [22]

rový. Zajímavým projektem, který tento počítač umožnil, byl Sketchpad vytvořen Ivanem Sutherlandem. Tento program byl první, který umožnil interaktivně kreslit na obrazovku. Obrazovka byla velká 7x7 palců s rastrem 1024x1024 bodů a psalo se na ní perem, které zachytávalo světlo z obrazovky. Poloha pera se poté poslala do počítače a na daném místě se vybarvil bod. Druhou rukou ovládal uživatel box s přibližně 40 tlačítky, které měly funkce jako mazání, zoomování či ukládání. Tím vznikl první počítač s interaktivní počítačovou grafikou. [38, 13, 27, 1, 22]

S postupným vývojem počítačů se začaly vytvářet i grafické algoritmy. Jedním z nich je Bresenhamův algoritmus. Vytvořil ho Jack Elton Bresenham v roce 1962 v International Business Machines Corporation (IBM). Tento algoritmus se používá ke kreslení úsečky mezi dvěma body. Jelikož počítačová obrazovka je rozdělena na pixely, pokud daná úsečka není vodorovná ani svislá, nelze ji vykreslit přesně. Algoritmus determinuje, jaký z dvojice pixelů

se více blíží funkci požadované úsečky a tento pixel vybarví. Dalším zajímavým algoritmem je ray casting. První obrázek byl vytvořen v roce 1968. Tento algoritmus funguje tak, že nejdříve uživatel definuje objekty, které chce mít ve své scéně jako matematické rovnice. Pro každý objekt se definuje model osvětlení, což udává jakou má barvu a jak se od něj světlo odráží. Poté se z pohledu kamery vyšle na každý pixel na obrazovce paprsek. Ten putuje, dokud se nezastaví o nějaký námi vytvořený objekt. Následně se z každého místa zastavení vyšle stínový paprsek do zdroje světla. Pokud cestou tento paprsek potká nějaký jiný objekt, daný objekt blokuje světlo, takže tento bod bude ve stínu. [38, 28, 31]

V průběhu 70. let se vyvíjely a vylepšovaly renderovací algoritmy. Jedním z problémů, který bylo potřeba vyřešit, byl hidden surface determination problem. Renderování částí objektů, které nejsou z pohledu kamery vidět zbytečně zatěžuje CPU. Tento problém řeší více rozdílných algoritmů, jako Z-buffer algorithm, Painter's algorithm nebo Binary Space Partitioning. Nejpopulárnější z nich je Z-buffer algoritmus vytvořen Wolfgangem Straßerem v roce 1974. Depth buffer uchovává nejmenší dosud naleznutou hloubku a pokud se přidá nový fragment na daný pixel, algoritmus porovná obě hloubky a pokud je blíže kameře, depth buffer se přepíše na novou hloubku. Další významný pokrok byl v oblasti shadingu. Doposud se využíval k barvení flat shading, takže každý polygon měl svojí vlastní barvu. V roce 1971 vytvořil Henri Gouraud gouraud shading. Tato metoda ukládá barvu polygonů jen do vrcholu daného polygonu, a následně se vypočítává barva každého pixelu váženým poměrem podle vzdálenosti od daného vrcholu. Dalším z důležitých technik je Phong shading, kterou vytvořil Bui Tuong Phong v roce 1974. Pro každý pixel se počítá, jak na daný pixel dopadá světlo a jak se od něj odráží. To se následně aplikuje pro výhcozí barvu polygonu. Tato technika je velice náročná a mohla se plně začít využívat až s rovojem GPU. Pokrok se udělal i v realističnosti povrchů. Pokud by povrch měl mít nějaké výstupky či hrbolky, museli by býti dodány v popisu daného polygonu. Tento problém řeší technika zvaná Bump Mapping, vytvořena Jamesem Blinnem v roce 1978. Vytvoří se texturová mapa, která určuje kde je vrcholek a kde prohlubeň. Poté se ve fázi počítání světla místa s vrcholekm udělají světlejší a místa s prohlubní tmavější, což dodává efekt hrbolatého povrchu na uplně rovném polygonu. [49, 30, 29, 10, 17]

V 80. letech začaly vytvářet první počítače, které byly dostupné pro veřejnost a začala se využívat GPU. Počítačová grafika se začala využívat ve filmovém průmyslu. V roce 1982 vyšel film Tron, který první masivně využíval CGI. Posun se udělal i v modelování vytvořením matematického modelu Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS). Tento model

je schopen z bodů a uzlu vytvořit 3D křivku nebo plochu. Další důležitý model byl Cook-Torrancův, který popisuje bidirectional reflective distribution function (BRDF). Tento model je podobný Phong shadingu, ale narozdíl od něj dodržuje fyzikální korektnost. Odražené světlo nikdy nemůže přesahovat světlo dopadající, čímž se vyrendrovaná věc zdá realističtější. Dalším důležitým algoritmem je radiosity algorithm. Tento algoritmus počítá světlo polygonu součtem světla kolik vyzařuje a kolik světla přijímá od ostatních polygonů. Narodil ale od starších algoritmu všechny polygony také nějaké světlo odrážejí, což je dáno povrchem polygonu. Toto odražené světlo se také počítá do celkového osvětlení ostatních polygonů. Významné zlepšení proběhlo u Ray Casting algoritmu. Paprsek se místo toho, aby se o polygon zastavil, odrazí a algoritmus se znovu rekurzivně spustí pro tento paprsek. Toto zlepšení umožňuje vidět v odraze jednoho polygonu polygon druhý. [2, 26, 40, 36, 7]

V průběhu 90. let se významně vylepšovaly domácí počítače, které dokázali spustit i složitější programy a hry. 3D grafika se stala populárnější a vznikala pro ni i software jako Blender nebo 3D Studio. Nevznikly žádné nové revoluční renderovací metody, ale díky zlepšení výkonu počítačů se mohly začít využívat metody dříve vytvořené, které byly příliš náročné pro tehdejší počítače. Velký pokrok zaznamenal filmový průmysl. Terminátor 2 použil CGI na realistického humanoidního robota. V roce 1995 vydal Pixar první celovečerní plně počítačově animovaný film Toy Story. 90. léta jsou označována jako zlatý věk videoher. První z důležitých her je Wolfenstein 3D. Tato hra využívá ray-casting, takže není 3D, ale vytváří iluzi 3D prostoru. Další důležitou hrou je Doom. Tato hra byla 2.5D, tedy kombinovala prvky 2D a 3D. Zdi a podlaha byly 3D modely, ale příšery byly 2D sprity, kterých bylo více a ukazovaly se podle toho pod jakým úhlem se hráč na příšeru koukal. První plně 3D hra byla Quake. Quake měl pokročilý client-server multiplayer, takže bylo možno hrát nejen na LAN, ale i přes internet. 3D modely umožnili vývojářům přidat do hry 3. rozměr a tím i více patrové mapy či létající projekty a nepřátele. [5, 14, 11, 21, 19]

V novém tisíciletí se zlepšovalo vše, co se doposud vynalezlo. Renderovací algoritmy mohli být více realistické kvůli zlepšení GPU.

Společně s vývojem počítačové grafiky začaly vznikat i první videohry. Hra Spacewar! byla jedna z prvních, která se rozšířila po laboratořích na amerických univerzitách. Hru vytvořil na MIT Steve Russell a jeho přátelé v roce 1962. Hra byla vytvořena pro dva hráče, každý ovládal svou loď a jeho cílem bylo sestřelit loď protivráce. Lodě byly ovládány speciálním boxem, který se dá považovat za předchůdce moderních herních kontrolerů. Hra běžela na počítači PDP-1, který namísto rasterové grafiky využíval grafiku vektorovou. Věci vykreslené



na osciloskopu byly definované matematickou funkcí. Díky tomu, že vektorová grafika nebyla tolik náročná na CPU jako rasterová, mohla ve hře být hvězda, která svojí gravitací působila na loď. [42, 6, 48]

## 2.2 Grafické karty

### 2.2.1 CPU vs. GPU

Tradičně běžela většina aplikací sekvenčně, které běží na procesorech, které mají centrální výpočetní jednotku a provádí instrukce jednu po druhé CPU. V průběhu 20. století se výkon CPU významně zlepšoval až na bilion operací za sekundu, čímž se mohli zlepšovat grafické aplikace a využívat náročnější funkce. Na přelomu tisíciletí se ale vývoj začal zpomalovat, kvůli problému se spotřebou energie a odvodem tepla. Proto výrobci začali vytvářet CPU s více jádry, ale ani to nebylo dostatečně výkonné na složité výpočty, a proto už v sedmdesátých a osmdesátých letech začali vznikat počítače které nepracovali sekvenčně, ale paralelně. V devadesátých letech se začali vytvářet mikroprocesory, které se soustředili na paralelní výpočty GPU. V průběhu let se počet jader z jednotek dostal na tisíce, což vytvořilo prostor pro inovaci v grafice. [24]

Prvně bylo GPU pouze v počítačích specializovaných pro 3D hry a vizualizace, ale postupně se stala součástí každého počítače. GPU a CPU se používá v různých případech kvůli rozdílné architektuře. CPU má jednotky až desítky jader a umí dělat jeden krok extrémě rychle kvůli sekvenčnímu zapojení. Velká část čipu je určena pro cachi, tedy malu pamět, kam se ukládají data která budou pravděpodobně v budoucnosti potřeba, takže není potřeba komunikovat neustále s RAM. Část čipu je také pro control logiku, která dokáže instrukce z jednoho vlákna dělat paralelně nebo na jiném sekvenčním pořadí, ale zachovat sekvenčnost celého procesu. CPU má také menší propustnost paměti než GPU, proto jsou cache-friendly programy výrazně rychlejší. Narozdíl od toho má GPU stovky až tisíce jader. Kontrolní logika a cache jsou v jádru menší a jednodušší, takže velmi pomalu reaguje na události a po dokončení operací se většinou data vrací zpět do virtual random access memory VRAM, což je díky velké propustnosti i pro velmi velký objem dat rychlé. [24]

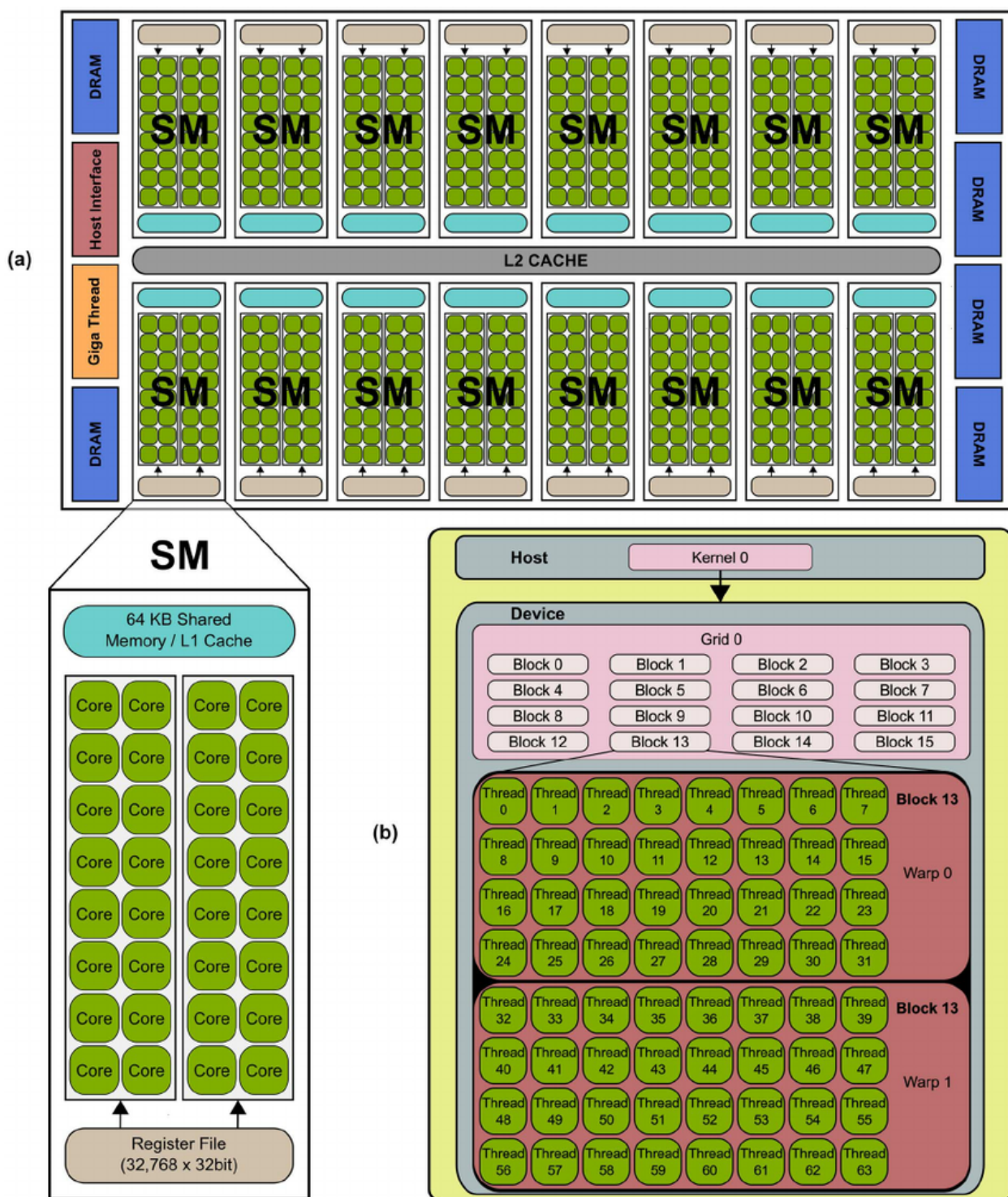
Do roku 2007 se GPU používal převážně pro renderování, ale v roce 2007 přišla NVIDIA s programovacím modelem pro paralelní výpočty CUDA. Tento model umožňuje psát programy, které běží na GPU a využívají CPU na přenos dat a řízení těchto programů. Díky

tomu mohli zacít vznikat aplikace, které normalně běží na CPU, ale při potřebě náročnějších početních operací mohly běžet na GPU, a tím zvýšit výkon. Pro účel vysvětlení programovacích modelů pro paralelní výpočty budou využívat model CUDA, přičemž existují i jiné podobné modely jako OpenCL nebo SYCL. [24]

### 2.2.2 Architektura a paměťová hierarchie GPU

GPU s podporou CUDA je organizováno do pole paralelních streamovacích multiprocesorů SM. Každý SM se skládá z několika streamovacích procesorů SP, které jsou základní výpočetní jednotkou, na které probíhají aritmetické operace. Další součásti jsou řídicí jednotky, které načítají instrukce pro daný SM. Řídicí jednotky také obsahují malou cache na instrukce, aby se pro ně nemuselo pořád sahát do RAM. Dále je uvnitř SM warp scheduler, který řídí, které skupiny vláken budou v každém cyklu použity. [24]

Většina grafických karet má svoji vlastní dynamic random access memory DRAM, které se říká globalní paměť. V grafických kartách je specifický typ DRAM zvaný VRAM. Tato paměť má jednotky až desítky gigabytů. Dochází v ní k výměně dat mezi host memory. Rychlá výměna dat mezi host memory a VRAM je zaručena velkou propustností, která je způsobena načítáním dat blokově namísto sekvencně a také posíláním většího objemu dat najednou. VRAM je sdílena mezi všemy SM, ale přístup k ní je relativně pomalý. Další paměť je shared memory, která má většinou desítky kilobajtů. Tuto paměť má každý SM, a každý SP si do ní může sahát. V každém SM se také vyskytuje L1 cache, která slouží k uchovávání dat, ze kterých se nedávno četlo nebo byla změněna. Dále existuje L2 cache, která je větší než L1 cache, a je jedna pro všechny SM. Používá se pro uchovávání dat nedávno získána nebo poslána do VRAM. Část VRAM je také určena pro dva jiné typy paměti a to texture a constant memory. Obe paměti mají k sobě přiřazenou svoji cache a jsou read-only. Tím že jsou read-only, můžeme často používané hodnoty uchovávat v cache bez obavy z toho, že by se daná proměnná mohla v průběhu změnit. Nejmenší, ale také nejrychlejší části paměti jsou register files. Tato paměť přímo komunikuje s SP a ukládají se do ní dočasné proměnné a mezivýpočty. [24, 8, 50]



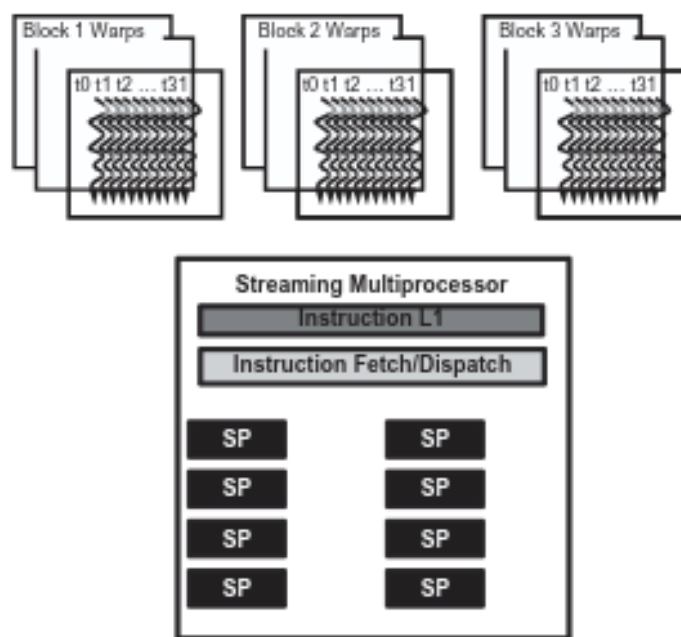
Obrázek 2.2: Typická architektura NVIDIA GPU [35]

### 2.2.3 Paralelismus

Paralelismus je výpočetní technika, která umožňuje vykonávání více operací najednou. Paralelismus se dá rozdělit do dvou kategorií. První z nich je úlohový paralelismus. Tento typ následuje Multiple Instructions, Multiple Data (MIMD) model. Tento model rozdělí různé

ulohy mezi více vláken nebo i jader. Tento model se využívá, pokud na sobě nejsou ulohy závislé. Pokud by se například chtěla vypočítat suma arraye, může každé vlákno počítat jednu polovinu a dva výsledky sečíst. MIMD se využívá v simulacích nebo na webových aplikacích. [24, 9]

Druhou metodou je data paralelismus, který je definován Single Instruction, Multiple Data (SIMD) modelem. Tento model aplikuje jednu úlohu pro velké množství dat a využívá se v GPU. Používá se například při násobení matic, kde se daná matice dá rozdělit na menší části nebo při vykreslování, kdy se jeden shader aplikuje pro každý pixel. V grafických kartách se jednotlivá vlákna sdružují do warpu, ty dále do bloku, které planuje SM. Do každého warpu jsou nacteny stejné instrukce a postupně se se mu dodávají data, na kterých dané instrukce provádí. Díky tomu lze i velké množství dat zpracovat velmi rychle, protože se dodávají s velkou propustností a instrukce na nich jsou prováděny současně na velkém množství warpu. [24, 9]



**FIGURE 3.13**

Blocks are partitioned into warps for thread scheduling.

Obrázek 2.3: Rozdělení vláken do warpu v SM [24]

## **2.3 Grafická pipeline**

## **2.4 Transformace a lineární algebra**

## **3    OpengGL**

### **3.1   Historie OpenGL**

### **3.2   OpenGL pipeline**

### **3.3   Shadery**

### **3.4   Textury**

## 4 to do

mozna pridat trochu historie compileru u C a CPP

celá část historie počítačové grafiky je scuffed, chybí tam části o gpu, a nejspis to bude potreba zkratit a udelat rozdeleni do subsectionu podle let

kdyz introdusuju zkratku, dej ji velka pismena, at ctenar vi ze je to zkratka  
predelat pomlcky z - na tu dinvou co pouziva chat a chce ji pazi

## Část II

# Vývoj hry v OpenGL



## **5 Grafika a zvuk**

### **5.1 Aseprite**

### **5.2 Bosca Ceoil**

## 6 Použité knihovny

### 6.1 GLAD

### 6.2 GLFW

### 6.3 stb\_image

## **7 Herní scény**

### **7.1 Scéna hlavního menu**

### **7.2 Scéna pozastavené hry**

### **7.3 Scéna hry**

## 8 Herní mechaniky

### 8.1 Generování objektů

### 8.2 Pohyb hráče

### 8.3 Detekce kolize

## Závěr

# Bibliografie

1. *A Critical History of Computer Graphics and Animation* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20070405181508/http://accad.osu.edu/%7Ewayne/history/lesson2.html>. [citováno 2025-11-07].
2. AKENINE-MÖLLER, Tomas et al. *Real-Time Rendering*. 4th. A K Peters/CRC Press, 2018.
3. ALBATROSS. *History of C++* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cplusplus.com/info/history/>. [citováno 2025-10-17].
4. BANAHAAN, Mike; BRADY, Declan; DORAN, Mark. *The C Book: Featuring the ANSI C Standard(Instruction Set)*. 2nd. Addison-Wesley, 1991. ISBN 9780201544336.
5. BHATTACHEJEE, Souktik. *A timeline of 3D softwares* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.re-thinkingthefuture.com/career-advice/a2944-a-timeline-of-3d-softwares/>. [citováno 2025-12-02].
6. BRITANNICA. *vector graphics* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.britannica.com/technology/vector-graphics/additional-info#history>. [citováno 2025-11-12].
7. CCGOMENZ. *Radiosity Algorithm* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ccgomezn.github.io/vc/docs/workshops/rendering/radiosity>. [citováno 2025-11-17].
8. COMPUTE, Arc. *Memory Hierarchy of GPUs* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://www.arccompute.io/arc-blog/gpu-101-memory-hierarchy>. [citováno 2025-12-13].
9. CSBRANCH. *Types of Parallelism: Data vs. Taks Parallelism* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://csbranch.com/index.php/2024/10/26/types-of-parallelism-data-vs-task-parallelism/>. [citováno 2025-12-15].

10. DIGITAL ARTS, Copenhagen Academy of. *WHAT IS PHONG SHADING? (GUIDE WITH EXAMPLES)* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cada-edu.com/guides/what-is-phong-shading>. [citováno 2025-11-15].
11. DOUGC. *What was the deal with 2.5D games like DOOM* [Online]. 2002. Dostupné také z: <https://boards.straightdope.com/t/what-was-the-deal-with-2-5d-games-like-doom/105737/3>. [citováno 2025-12-02].
12. ENGEL, Wolfgang. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.
13. ENGINEERING; WIKI, Technology History. *Milestones:Whirlwind Computer, 1944-59* [Online]. 2024. Dostupné také z: [https://ethw.org/Milestones:Whirlwind\\_Computer,\\_1944-59](https://ethw.org/Milestones:Whirlwind_Computer,_1944-59). [citováno 2025-11-06].
14. FRONT, Wolf. *Development History* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://wolfenstein3d.nl/development-history/>. [citováno 2025-12-02].
15. GEEKSFORGEEEKS. *Features of C* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.geeksforgeeks.org/c/features-of-c-programming-language/>. [citováno 2025-10-12].
16. GEEKSFORGEEEKS. *Top 25 C++ Applications inf Real World[2025]* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.geeksforgeeks.org/blogs/top-applications-of-cpp-in-real-world/>. [citováno 2025-10-22].
17. GLOSSARY, Computer Graphics. *Bump Mapping - Definition & Detailed Explanation - Computer Graphics Glossary Terms* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://pcpartsgEEK.com/bump-mapping/>. [citováno 2025-11-15].
18. HARBISON, Samuel P.; STEELE, Guy L. *C, a Reference Manual*. 5th. Prentice-Hall, 2002. ISBN 9780130895929.
19. HICKMAN, Zachary. *Quake Engine Analysis* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://zhickman.com/analysisfinal.pdf>. [citováno 2025-12-02].
20. HUGHES, John F. et al. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 3rd. Addison-Wesley Professional, 2013.

21. JPIOLHO. *[2021 Re-release] How multiplayer works* [Online]. 2021. Dostupné také z: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=2624343184>. [citováno 2025-12-02].
22. KAY, Alan. *Vision & Reality of Hypertext and Graphical User Interfaces* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://mprove.de/visionreality/text/3.1.2\\_sketchpad.html](https://mprove.de/visionreality/text/3.1.2_sketchpad.html). [citováno 2025-11-07].
23. KERNIGHAN, Brian W.; RITCHIE, Dennis M. *The C Programming Language*. 2nd. Pearson, 1988. ISBN 9780131103627.
24. KIRK, David B.; HWU, Wen-mei W. *Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach*. 3rd. Morgan Kaufmann, 2016.
25. KOCHAN, Stephen G. *Programming in C*. 4th. Pearson Education, 2015. ISBN 9780321776419.
26. KONOW, David. *Putting the Original Tron's Special Effects Together* [Online]. 2015. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20180512181521/http://www.tested.com/art/movies/520562-putting-original-trons-special-effects-together/>. [citováno 2025-11-16].
27. LABORATORY, Lincoln. *SAGE: SEMI-AUTOMATIC GROUND ENVIRONMENT AIR DEFENSE SYSTEM* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.ll.mit.edu/about/history/sage-semi-automatic-ground-environment-air-defense-system>. [citováno 2025-11-06].
28. LABS, BCA. *Vision & Reality of Hypertext and Graphical User Interfaces* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://bcalabs.org/subject/bresenhams-line-algorithm-in-computer-graphics>. [citováno 2025-11-11].
29. LEE, Sarah. *Mastering Gouraud Shading Techniques* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-gouraud-shading-techniques>. [citováno 2025-11-15].
30. LOGAN. *Z-Buffer Algorithm* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.onlycode.in/z-buffer-algorithm/>. [citováno 2025-11-15].
31. LONDON, Imperial College. *Ray Tracing* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.doc.ic.ac.uk/~bkainz/graphics/notes/GraphicsNotes1011.pdf>. [citováno 2025-11-12].



32. MORTENSEN, Peter. *What's the difference between a low-level, midlevel and high-level language* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://stackoverflow.com/questions/3468068/whats-the-difference-between-a-low-level-midlevel-and-high-level-language>. [citováno 2025-10-13].
33. NAPPER, Brian. *The Manchester Small Scale Experimental Machine – "The Baby"* [Online]. 1999. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20120604211339/http://www.computer50.org/mark1/new.baby.html>. [citováno 2025-11-05].
34. NOLLE, Tom. *What is structured programming(modular programming)* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/structured-programming-modular-programming>. [citováno 2025-10-14].
35. NVIDIA. *Accelerating Fibre Orientation Estimation from Diffusion Weighted Magnetic Resonance Imaging Using GPUs* [Online]. 2013. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/figure/Typical-NVIDIA-GPU-architecture-The-GPU-is-comprised-of-a-set-of-Streaming\\_fig1\\_236666656](https://www.researchgate.net/figure/Typical-NVIDIA-GPU-architecture-The-GPU-is-comprised-of-a-set-of-Streaming_fig1_236666656). [citováno 2025-12-11].
36. OPENGL, Learn. *Theory, BRDF* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://learnopengl.com/PBR/Theory>. [citováno 2025-11-16].
37. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Eras and Environment*. 2nd. Springer Nature, 2023. ISBN 9783031135811.
38. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.
39. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Steps to invention*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031109676.
40. RHINOCEROS. *What are NURBS* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>. [citováno 2025-11-16].
41. SEVO, Daniel. *HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS 1990-99* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://www.danielsevo.com/hocg/hocg\\_1990.htm](https://www.danielsevo.com/hocg/hocg_1990.htm). [citováno 2025-12-03].
42. SMITH, Ryan P. *How the First Popular Video Game Kicked Off Generations of Virtual Adventure* [Online]. 2018. Dostupné také z: <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/how-first-popular-video-game-kicked-off-generations-virtual-adventure-180971020/>. [citováno 2025-11-12].

43. SRUTHY. *What Is C++ Used For? Top 12 Real-World Applications And Uses Of C++* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.softwaretestinghelp.com/cpp-applications/>. [citováno 2025-10-22].
44. STROUSTRUP, Bjarne. *Design and Evolution of C++, The*. 1st. Addison-Wesley Professional, 1994. ISBN 9780201543308.
45. STROUSTRUP, Bjarne. *Programming Principles and Practice Using C++*. 2nd. Pearson Education, 2014. ISBN 9780321992789.
46. STROUSTRUP, Bjarne. *The C++ Programming Language*. 4th. Pearson Education, 2013. ISBN 9780321563842.
47. TECH, WsCube. *Top Applications of C programming* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://www.wscubetech.com/resources/c-programming/applications>. [citováno 2025-10-09].
48. TILLEY, Thomas. *Spacewar! Controllers* [Online]. 2015. Dostupné také z: <https://tomtilley.net/projects/spacewar/>. [citováno 2025-11-12].
49. TODAY, Everything Explained. *Hidden-surface determination explained* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://everything.explained.today/Hidden-surface\\_determination](https://everything.explained.today/Hidden-surface_determination) [citováno 2025-11-15].
50. UNIVERSITY, Cornell. *Memory Types* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://cvw.cac.cornell.edu/gpu-architecture/gpu-memory/memory\\_types](https://cvw.cac.cornell.edu/gpu-architecture/gpu-memory/memory_types). [citováno 2025-12-13].
51. VOLLE, Adam. *C++ computer language* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.britannica.com/technology/C-computer-language>. [citováno 2025-10-17].

# Zkratky

**CPU** Central processing unit. 9, 11, 12

**CRT** Cathode ray tube. 7

**DRAM** Dynamic random access memory. 12

**GPU** Graphics processing unit. 9–12

**RAM** Random access memory. 7, 11, 12

**SM** Streaming multiprocessor. 12

**SP** Streaming processor. 12

**SSEM** Small-Scale Experimental Machine. 7

**VRAM** Video random access memory. 11

## Seznam obrázků

2.1	Skatchpad Ivana Sutherlanda [22]	8
2.2	Typická architektura NVIDIA GPU [35]	13
2.3	Rozdělení vláken do warpu v SM [24]	14

## Seznam tabulek

## Přílohy

## A Fotky z pokusů

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## B Příloha další