

Východiska implementace interaktivní simulace ve virtuální realitě pro podporu řešení mimořádných událostí

Dominik Doleček
Bakalářská práce | 2026

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2025/2026

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominik Doleček**
Osobní číslo: **A23152**
Studijní program: **B1032A020001 Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Východiska implementace interaktivní simulace ve virtuální realitě pro podporu řešení mimořádných událostí**
Téma práce anglicky: **Foundations for the Implementing an Interactive Simulation in Virtual Reality to Support Emergency Management**

Zásady pro vypracování

1. Analyzujte teoretická východiska krizového managementu, technologií virtuální reality a zpracujte literární rešerši zaměřenou na využití virtuální reality pro tréninkové účely.
2. Identifikujte a porovnejte současné technologie a metody pro tvorbu interaktivních simulací.
3. Specifikujte cíle, rozsah a klíčové požadavky pro vytvoření modelového tréninkového scénáře.
4. Zpracujte detailní návrh modelového tréninkového scénáře pro řešení mimořádné události.
5. Sestavte souhrn doporučení pro praktické nasazení VR do procesů krizového managementu.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ANTUŠÁK, Emil a Josef VILÁŠEK. Základy teorie krizového managementu. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3443-2.
2. JERALD, Jason. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. New York: Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, 2016. ISBN 978-1-97000-112-9.
3. BURDEA, Grigore C. a Philippe COIFFET. Virtual Reality Technology. 3rd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2024. ISBN 978-1-118-01480-6.
4. ALDRICH, Clark. The Complete Guide to Simulations and Serious Games: How the Most Valuable Content Will be Created in the Age Beyond Gutenberg to Google. San Francisco: Pfeiffer, 2009. ISBN 978-0-470-46273-7.
5. HUNG, Ming-Chuan, Ching-Yuan LIN a Gary Li-Kai HSIAO. "Virtual Reality in Building Evacuation: A Review." Fire. 2024, roč. 8, č. 2, s. 80. ISSN 2571-6255. DOI: 10.3390/fire8020080.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Ševčík, Ph.D.**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **9. prosince 2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2026**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 9. prosince 2025

Prohlášení autora závěrečné kvalifikační práce

Beru na vědomí, že

- odevzdáním závěrečné práce souhlasím se zpřístupněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- závěrečná práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému;
- jedno vyhotovení závěrečné práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – závěrečnou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování závěrečné práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky závěrečné práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem závěrečné práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na závěrečné práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze závěrečné práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá implementací virtuální reality do systému přípravy na mimořádné události v kontextu objektové bezpečnosti. Cílem práce je analyzovat potenciál VR technologií a navrhnout efektivní tréninkový nástroj pro podnikovou sféru. Teoretická část mapuje východiska havarijního plánování a srovnává dostupné technologie pro tvorbu simulací. Hlavním výstupem je podrobný návrh tréninkového scénáře a metodiky, která může sloužit jako základ pro budoucí praktické využití tohoto nástroje v rámci vzdělávacího a interního bezpečnostního systému organizace. Práce využívá metodu komparativní analýzy dostupných technologií a metodu syntézy poznatků z odborné literatury, jejichž výsledky jsou aplikovány při návrhu modelového tréninkového scénáře.

Klíčová slova

virtuální realita, objektová bezpečnost, mimořádná událost, interaktivní simulace, nácvik evakuace, havarijní plánování, unreal engine

Abstract

This bachelor thesis deals with the implementation of virtual reality into the emergency preparedness system in the context of facility security. The aim of the thesis is to analyze the potential of VR technologies and propose an effective training tool for the corporate sector. The theoretical part maps the principles of emergency planning and compares available technologies for creating simulations. The main output is a detailed proposal for a training scenario and methodology that can serve as a basis for the future practical use of this tool within the organization's educational and internal security system. This study employs a comparative analysis of available technologies and a synthesis of findings from the professional literature, the results of which are applied in the design of a model training scenario.

Keywords

virtual reality, facility safety, emergency situation, interactive simulation, evacuation training, emergency planning, unreal engine

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek.....	12
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	13
Seznam příloh.....	14
Úvod.....	15
1 Teoretická východiska a analýza probírané problematiky	17
1.1 Objektová bezpečnost a krizový management podniku.....	17
1.1.1 Dynamika vývoje krize a fáze disharmonie.....	17
1.1.2 Klíčová role akutní fáze a lidského faktoru.....	18
1.1.3 Statistická četnost mimořádných událostí a legislativní požadavky	19
1.2 Porovnání hasících přístrojů.....	20
1.3 Virtuální realita: Technologie a principy.....	22
1.3.1 Imerze.....	23
1.3.2 Prezence.....	23
1.4 3D grafika a metody tvorby virtuálního prostředí	24
1.4.1 Současné metody tvorby virtuálního prostředí	25
1.5 Metody digitalizace reálného prostředí.....	25
1.5.1 Fotogrammetrie.....	25
1.5.2 LiDAR a laserové skenování	27
1.5.3 Problémy pro výpočetní techniku	28
1.5.4 Neuronová pole zářivosti (NeRF) a 3D Gaussian Splatting.....	29
2 Analýza technologií pro tvorbu simulací	31
2.1 Historický vývoj a evoluce VR zařízení	31
2.1.1 Pionýrská éra (1950-1970)	31
2.1.2 Období popularity a zklamání (1980-1990)	32
2.1.3 Moderní doba (2012 - současnost).....	33
2.2 Architektura PC-VR (Tethered Systems).....	35
2.2.1 Výkon a grafická fidelita	35
2.2.2 Nevýhody pro facility management	35

2.3	Architektura Standalone VR	36
2.3.1	Technická specifikace a Inside-Out tracking.....	36
2.3.2	Výkonnostní limity a optimalizace	37
2.4	Vstupní zařízení a metody interakce	37
2.4.1	Standardní VR ovladače.....	37
2.4.2	Optické sledování rukou (Hand Tracking).....	38
3	Virtuální tréninkový simulátoru pro oblast bezpečnosti	39
3.1	Cíle tréninkového scénáře.....	39
3.2	Rozsah modelového scénáře	39
3.3	Klíčové požadavky na systém.....	39
3.4	Zdravotní aspekty a fyziologické limity uživatele	41
3.4.1	Vestibulární systém jako senzor pohybu.....	41
3.4.2	Eliminace rizik a volba metody pohybu.....	42
3.5	Rozdělení virtuálních tréninkových scénářů podle komplexity.....	42
3.6	Softwarové nástroje pro tvorbu virtuálního tréninkového simulátoru.....	43
3.6.1	Vývojové prostředí.....	43
3.6.2	Hand Tracking	45
3.6.3	Implementace uživatelského rozhraní (UI).....	45
4	Návrh modelového tréninkového scénáře.....	46
4.1	3D modely a materiály.....	46
4.1.1	Hasící přístroje.....	46
4.1.2	Částicový systém pro simulaci hasiva	50
4.1.3	Modely interaktivního počítače a žaluzie.....	50
4.1.4	Únikové dveře.....	51
4.2	Zdroje 3D modelů.....	53
5	Souhrn doporučení pro nasazení virtuálních tréninkových simulátorů v bezpečnostní praxi.....	55
	Závěr.....	57
	Seznam použité literatury	59

Seznam obrázků

Obr. 1: Vývojová stádia krize [6].....	18
Obr. 2: Návrat systému do normálního stavu [6].....	19
Obr. 3: Zánik systému [6].....	19
Obr. 4: Trojúhelník I3 definující základní složky VR [1].....	23
Obr. 5: Hasící přístroj zachycený fotogrammetrií.....	26
Obr. 6: Místnost zachycená fotogrammetrií	27
Obr. 7: LiDAR scanner XGRIDS Lixel L2 PRO.....	28
Obr. 8: Jednoduchá ukázka LiDARu [14]	28
Obr. 9: Atrium UTB, metoda Gaussian splatting.....	30
Obr. 10: Tatry metoda Gaussian splatting.....	30
Obr. 11: Prototyp simulátoru Sensorama [1]	31
Obr. 12: Damoklův meč Ivana Sutherlanda [1]	32
Obr. 13: Nintendo Virtual Boy [11].....	33
Obr. 14: Oculus Quest [12].....	34
Obr. 15: Meta Quest 3	34
Obr. 16: PC-VR zapojené drátově [13]	36
Obr. 17: Meta Quest 3 s označenými kamerami [14].....	37
Obr. 18: Ovladače Meta Quest Touch Plus [14]	38
Obr. 19: Meta Quest 3 Hand Tracking [16]	38
Obr. 20: Anatomické schéma vnitřního ucha [16]	41
Obr. 21: Vývojové prostředí Unreal Engine	44
Obr. 22: Vizualní skriptování	44
Obr. 23: Ukázka widget textu	45
Obr. 24: Model práškového hasícího přístroje.....	48
Obr. 25: Model CO2 hasícího přístroje	49
Obr. 26: Vizualizace nastavení hasiva	50
Obr. 27: Zapálený model počítače.....	51
Obr. 28: Model únikových dveří	53

Seznam tabulek

Tab. 1: Podíl mimořádných situací	20
Tab. 2: Porovnání hasících přístrojů	21
Tab. 3: Zdroje z Unreal Engine Fab	53
Tab. 4: Zdroje z Sketchfab.....	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

VR	Virtuální realita
Např.	Například
Tzv.	Takzvaně
MMD	Zobrazovací systémy
FOV	Zorné pole
PPD	Rozlišení a hustota pixelů
GPU	Dedikované grafické akcelerátory
SLAM	Algoritmus počítačového vidění
NeRF	Neuronová pole zářivosti
6-DOF	Šest stupňů volnosti
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
CAD	Počítačem podporované navrhování
BIM	Informační model stavby
DOF	Hloubka ostrosti
UI	Uživatelské rozhraní
VFX	Vizuální efekty
ARM	Architektura procesorů

Seznam příloh

Přílohy vložené v závěrečné práci

Příloha A: Manuál pro tréninkový simulátor

Příloha B: Projekt v Unreal Engineu

Úvod

Zajištění bezpečnosti osob a majetku patří mezi prioritní úkoly managementu každého objektu, ať už se jedná o administrativní budovy, výrobní haly či veřejné instituce. Schopnost personálu a návštěvníků správně reagovat v případě vzniku mimořádné události, například při požáru, úniku nebezpečných látek nebo nutnosti okamžité evakuace je klíčovým faktorem, který rozhoduje o minimalizaci škod a ochraně lidských životů. Tradiční metody školení v oblasti požární ochrany a bezpečnosti práce, často založené na pasivní prezentaci teoretických informací nebo schematickým nácviku, se však v praxi mohou ukázat jako nedostatečné, jelikož účastníci školení často postrádají reálnou představu o stresových faktorech mimořádné události, což v případě skutečného ohrožení může vést k panice, chybnému rozhodování nebo nečinnosti.

Rozvoj moderních technologií, konkrétně virtuální reality, přináší do oblasti vzdělávání a tréninku zcela nové možnosti. Jak uvádí aktuální studie autorů Hunga, Lina a Hsiaoa z roku 2024, VR technologie umožňuje simulovat evakuační scénáře s vysokou mírou realismu, aniž by byli účastníci vystaveni reálnému fyzickému nebezpečí. Tento posun od pasivního příjmu informací k aktivnímu prožitku (learning-by-doing) zásadně mění způsob přípravy na mimořádné události. Uživatelé si mohou v bezpečném virtuálním prostředí vyzkoušet postupy, udělat chyby a poučit se z nich, čímž si zapamatují správné vzorce chování efektivněji než při běžné přednášce.

Bakalářská práce se zabývá problematikou implementace interaktivních simulací ve virtuální realitě právě pro účely zvládnutí mimořádných událostí. Je však nezbytné hned v úvodu terminologicky vymezit pojetí krizového managementu, se kterým tato práce operuje. V souladu s odbornou literaturou se text nezabývá krizovým managementem na úrovni státní správy či integrovaného záchranného systému ve smyslu krizového zákona. Práce se striktně zaměřuje na objektovou úroveň, tedy na systémy vnitřní bezpečnosti, havarijní plánování a trénink zaměstnanců či správců konkrétních budov. Cílem není nahradit práci záchranářů, ale zefektivnit krizový management uvnitř organizace v kritických minutách před příjezdem profesionálů.

Hlavním cílem této práce je navrhnout komplexní řešení pro implementaci virtuální reality do systému havarijní přípravy na objektové úrovni. Práce si klade za cíl provést komparativní analýzu dostupných technologií a na jejím základě vytvořit detailní návrh tréninkového scénáře pro vybranou mimořádnou událost. Nedílnou součástí stanovených cílů je rovněž vytvoření souboru doporučení pro praxi, která definují postup pro efektivní integraci navržené simulace do stávajících procesů vnitřní bezpečnosti organizace.

Struktura textu je rozdělena do několika logicky navazujících celků. První část práce se věnuje teoretickým východiskům a rešerši literatury. Následuje technická analýza, s oporou v nejnovějších poznatcích o hardwaru, které ve své publikaci shrnují Burdea a Coiffet, práce porovnává dostupné zobrazovací systémy (HMD) a vyhodnocuje jejich vhodnost pro masové nasazení v organizacích.

Významná část práce je věnována specifikaci požadavků na samotný tréninkový scénář. Při návrhu virtuálního prostředí nelze opomenout lidský faktor. Práce proto aplikuje principy Human-Centered Design podle Jasona Jeralda, aby navržená simulace byla nejen edukativní, ale také uživatelsky přívětivá a minimalizovala riziko vzniku kinetózy (motion sickness). Závěr práce syntetizuje zjištěné poznatky do podoby uceleného návrhu, který definuje, jaké parametry musí simulace splňovat, aby byla validním nástrojem pro zvýšení bezpečnosti v objektech. [1][2][3][4]

1 Teoretická východiska a analýza probírané problematiky

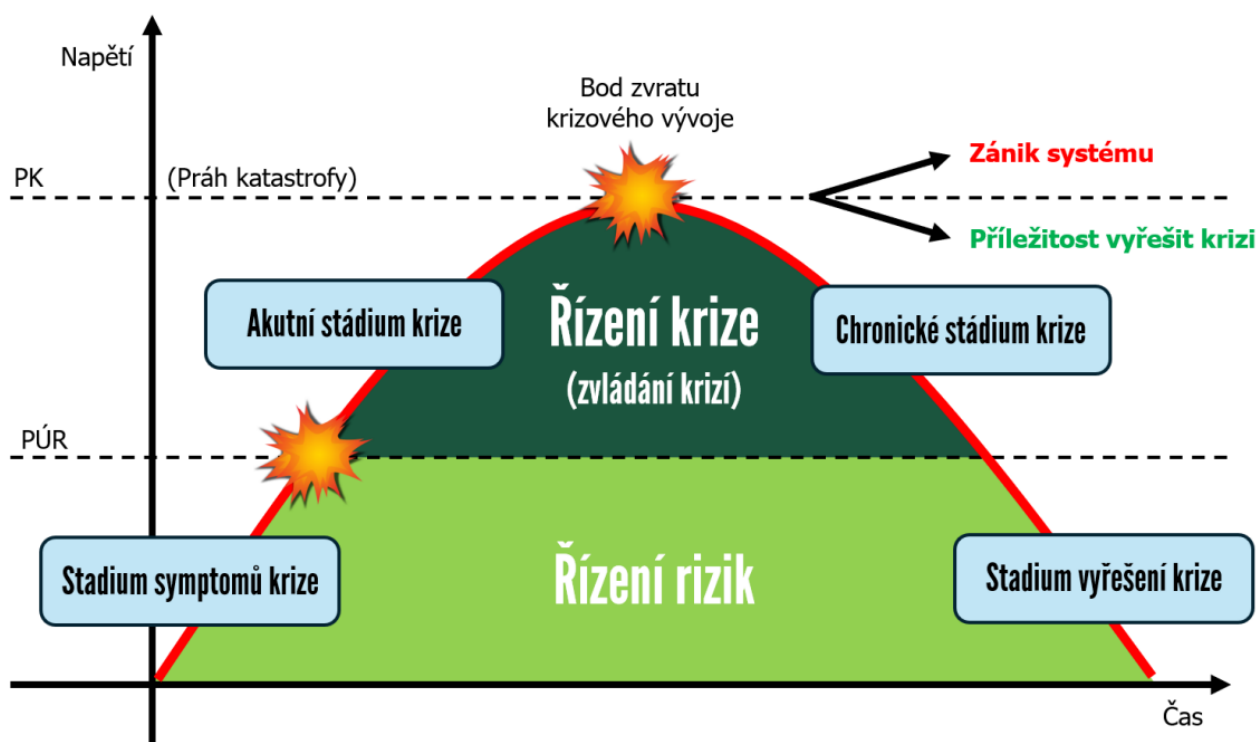
Cílem této kapitoly je vymezit terminologický a teoretický rámec práce. První část analyzuje bezpečnostní procesy v kontextu správy objektů a definuje krizový management jako nástroj podnikové ochrany. Následně jsou popsány technologické a psychologické principy virtuální reality. Závěr kapitoly předkládá rešerši aktuálních výzkumů potvrzujících efektivitu VR v oblasti edukace.

1.1 Objektová bezpečnost a krizový management podniku

Zajištění bezpečnosti v administrativních, výrobních či veřejných objektech nelze v moderním pojetí chápat izolovaně, ale jako integrální součást komplexního řízení podpůrných procesů, známého jako Facility Management. Dle studijních materiálů předmětu Bezpečnostní inženýrství (AP3BI) služby správy objektů jsou děleny na dvě základní kategorie, a to tvrdé služby (Hard Services), které zahrnují technickou správu budov, údržbu infrastruktury a energetický management a měkké služby (Soft Services), které se zaměřují se na organizaci lidí, recepční služby a na bezpečnostní procedury. Bakalářská práce se pohybuje na průniku těchto dvou oblastí. Zatímco technické vybavení spadá do tvrdých služeb, schopnost personálu toto vybavení použít a správně reagovat je doménou služeb měkkých. Právě zde nastupuje role krizového managementu. [5]

1.1.1 Dynamika vývoje krize a fáze disharmonie

Každá mimořádná událost (např. požár v kanceláři, únik plynu v technické místnosti) nepropuká okamžitě v plné síle, ale má svou dynamiku vývoje. Pro pochopení nutnosti včasného zásahu je klíčové analyzovat tzv. životní cyklus krize. Dle teorie vyučované v rámci předmětu AP4KP jsou rozlišována čtyři vývojová stádia narušení rovnováhy systému, kde prvním je stadium symptomů, jde o prvotní varovné signály, může jít o opakované poruchy elektroinstalace, nedbalost zaměstnanců při manipulaci s ohněm nebo ignorování bezpečnostních směrnic. V této fázi je možnost efektivního zásahu nejvyšší a náklady na řešení nejnižší. Dalším stádiem je akutní stadium, pokud nejsou symptomy podchyceny, dochází k propuknutí krize (např. vznik požáru). Vyznačuje se prudkým nárůstem škod, časovým tlakem, nedostatkem informací a vysokou mírou stresu, systém se dostává do stavu „disharmonie“. Předposledním stádiem, které může nastat je chronické stadium, jedná se o fázi způsobenou nedostatečným zvládnutím krize, kde i přes utlumení se intenzita krize opět začne zvyšovat. Posledním stádiem je stadium vyřešení nebo zániku, může se jednat o návrat do normálního stavu, nebo v případě nezvládnuté krize zánik systému (podniku/objektu). Graficky lze tento vývoj znázornit jako křivku míry disharmonie v čase. Cílem krizového manažera je udržet tuto křivku pod prahem katastrofy, jelikož pokud křivka tuto mez překročí dojde k zániku systému. [4] [6]

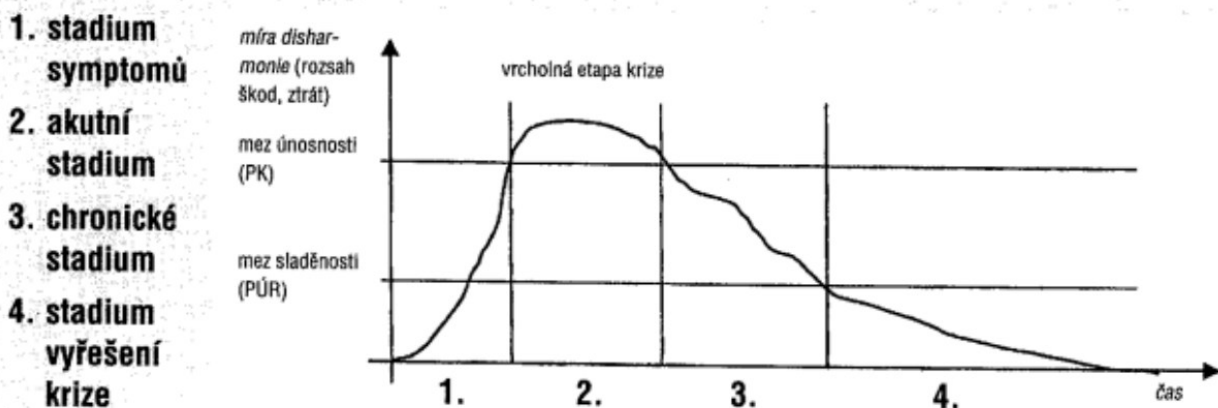


Obr. 1: Vývojová stádia krize [6]

1.1.2 Klíčová role akutní fáze a lidského faktoru

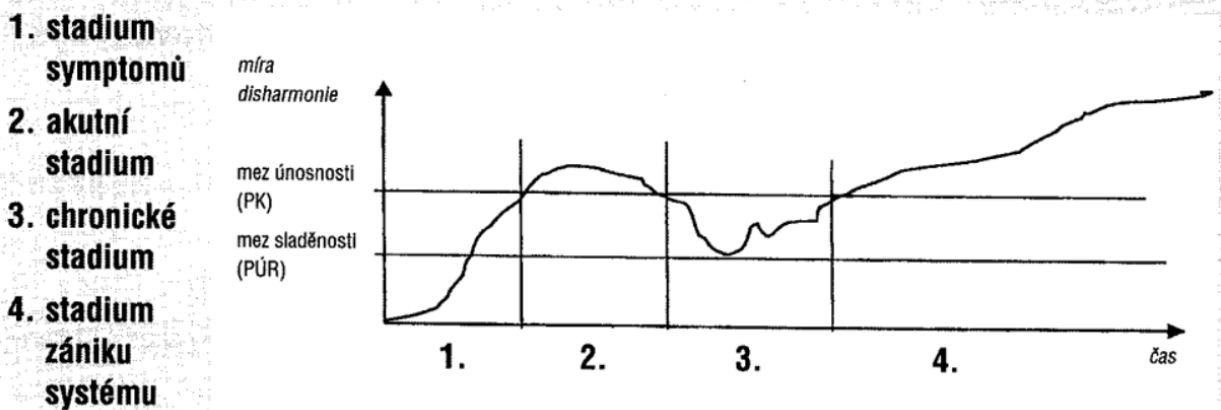
Z hlediska záchrany lidských životů a majetku je nejkritičtější akutní stadium, v této fázi rozhodují minuty, někdy i sekundy. Zatímco technické systémy (např. sprinklery) reagují automaticky, lidský faktor v této fázi může často selhávat, důvodem selhání často bývá psychologický tlak, v akutním stádiu totiž dochází k fenoménu zúženého vnímání (tunelové vidění). Zaměstnanec, který v klidu u stolu zná teoretický postup evakuace, není schopen si jej pod tlakem vybavit. Tradiční metody přípravy personálu mají v tomto ohledu zásadní nedostatky, kde školení formou prezentace neposkytuje sensorický vjem (kouř, hluk alarmu) zaměstnanec si nedokáže představit reálné podmínky. Dalším problémem dosavadních metod je absence rozhodování, při běžném nácviku evakuace jdou všichni za sebou a nikdo není nucen dělat samostatná rozhodnutí (např. „Mám hasit, nebo utéct?“, „Tato cesta je zablokovaná, kudy jít jinudy?“). Právě tato neschopnost efektivně jednat v akutním stádiu krize je hlavním argumentem pro zavedení simulačních technologií. Virtuální realita umožňuje bezpečně navodit podmínky akutního stádia (včetně vizuálního a akustického stresu) a naučit zaměstnance udržet míru disharmonie pod mezí únosnosti. [6]

Fáze vývoje dobře řízení krize vyjadřují posloupnost narušení rovnováhy systému a představují čtyři vývojová stadia krize:



Obr. 2: Návrat systému do normálního stavu [6]

Fáze špatně řízené krize (neřízené krize) vyjadřují posloupnost narušení rovnováhy systému a představují čtyři vývojová stadia krize:



Obr. 3: Zánik systému [6]

1.1.3 Statistická četnost mimořádných událostí a legislativní požadavky

Při návrhu tréninkových simulací je nezbytné vycházet z relevantních rizikových analýz a reálných statistik. Podle aktuální Statistické ročenky Hasičského záchranného sboru České republiky došlo v roce 2025 k 19 031 požárům, z čehož 6 952 případů tvořily požáry budov. Požár představuje jednu z nejkompexnějších hrozeb, jelikož kromě přímého ohrožení plameny vytváří i toxický kouř, který vyžaduje rychlou reakci přítomných osob. Další velmi častou mimořádnou událostí jsou technické havárie, které v roce 2025 tvořily 55,06 % všech zásahů, o celkovém počtu 81 364 případů.

Tab. 1: Podíl mimořádných situací

Kategorie události	Počet událostí v roce 2025	Podíl z celkového počtu	Meziroční změna
Technické havárie	81 364	55,06 %	-31 %
Dopravní nehody	25 050	16,95 %	+6 %
Požáry	19 031	12,88 %	+8 %
Plané poplachy	12 491	8,45 %	-1 %
Úniky nebezpečných chemických látek	9 763	6,61 %	+6 %
Ostatní mimořádné události	69	0,05 %	-42 %
CELKEM	147 768		

Při volbě modelového scénáře pro virtuální realitu však hraje klíčovou roli nejen statistická četnost incidentů, ale především legislativní závaznost a s ní spojená komerční využitelnost v praxi. Povinnost zpracovávat dokumentaci požární ochrany, jejíž nedílnou součástí je požární evakuační plán a požární poplachová směrnice, je v České republice stanovena zákonem č. 133/1985 Sb., o požární ochraně. Tato povinnost se nevztahuje plošně na všechny subjekty, ale dopadá primárně na právnické osoby a podnikající fyzické osoby, které provozují činnosti zařazené do kategorie se zvýšeným nebo vysokým požárním nebezpečím. Konkrétní parametry pro zařazení do těchto rizikovějších skupin detailně rozvádí prováděcí vyhláška č. 246/2001 Sb., o požární prevenci. Do kategorie se zvýšeným požárním nebezpečím spadají například budovy se složitými únikovými cestami, budovy o sedmi a více nadzemních podlažích, nebo objekty, kde se běžně vyskytuje více než 200 osob současně. Z definice těchto legislativních podmínek jasně vyplývá, že velká část moderních kancelářských budov či průmyslových provozů tuto zákonnou klasifikaci naplňuje a stává se tak subjektem se zvýšeným požárním nebezpečím.

Pro tyto organizace to v praxi znamená striktní zákonnou povinnost nejen evakuační plány a směrnice fyzicky zpracovat, ale především s nimi své zaměstnance prokazatelně seznámit a v pravidelných intervalech provádět nácviky cvičných evakuací. Na rozdíl od specifických hrozeb, jako je útok aktivního střelce (AMOK) či masivní výpadek energií (blackout), jejichž nácvik závisí spíše na dobrovolných interních analýzách firem v rámci plánů kontinuity podnikání, je příprava na zahoření legislativně nutná. Téma požární evakuace je tak statisticky nejčastěji implementovaným bezpečnostním scénářem v interních dokumentacích společností, čímž je perfektní pro použití v navrhovaném scénáři. [7]

1.2 Porovnání hasících přístrojů

V rámci požární ochrany jsou k prvotnímu zásahu často využívány sněhové a práškové hasící přístroje. Ačkoliv je u obou typů hlavním cílem rychlá likvidace plamenů, jejich mechanismus účinku a vhodnost pro konkrétní typy požárů se výrazně liší. Správná volba hasiva

je vždy podmiňována druhem hořlavé látky, čímž se minimalizují nejen rizika pro zasahující osoby, ale také rozsah sekundárních škod na majetku.

Sněhový hasicí přístroj je plněn stlačeným oxidem uhličitým, který je do prostoru požáru uvolňován pod vysokým tlakem. Při jeho aplikaci je oheň potlačen primárně vytlačením kyslíku a současně je zasažené místo prudce ochlazeno. Tento typ přístroje je doporučován především pro hašení elektrických zařízení pod proudem, hořlavých kapalin a jemné elektroniky. Jeho hlavní předností je skutečnost, že po odpaření plynu nejsou v prostoru zanechány žádné zbytky hasiva, čímž je zasažená elektronika chráněna před dalším poškozením. Naopak není určen pro hašení pevných hořlavých látek, jako je dřevo či textil, neboť nedokáže zabránit jejich opětovnému vzplanutí, a nesmí být použit ani na sypké látky či hořlavý prach. Při manipulaci je rovněž nutné dbát zvýšené opatrnosti, jelikož při kontaktu pokožky s plynem hrozí nebezpečí vzniku omrzlin.

Práškový hasicí přístroj využívá jako hasivo speciální prášek, kterým je hořící materiál obalen a izolován od přístupu kyslíku. Tímto procesem je spolehlivě přerušena chemická reakce hoření. Tento přístroj je vysoce univerzální a je využíván k tlumení požárů pevných, kapalných i plyných látek. Často je proto volen jako standardní vybavení domácností či běžných komerčních prostor. Přestože je jeho hasicí efekt velmi rychlý a účinný, není doporučován k hašení počítačů, televizorů a další jemné elektroniky. Jemný prášek je totiž po aplikaci obtížně odstranitelný a může způsobit trvalé poškození vnitřních obvodů. Upozorňuje se také na to, že použití práškového přístroje v malých a neprodyšně uzavřených prostorech může být rizikové. Běžný práškový přístroj navíc nesmí být použit k hašení lehkých alkalických kovů. [8]

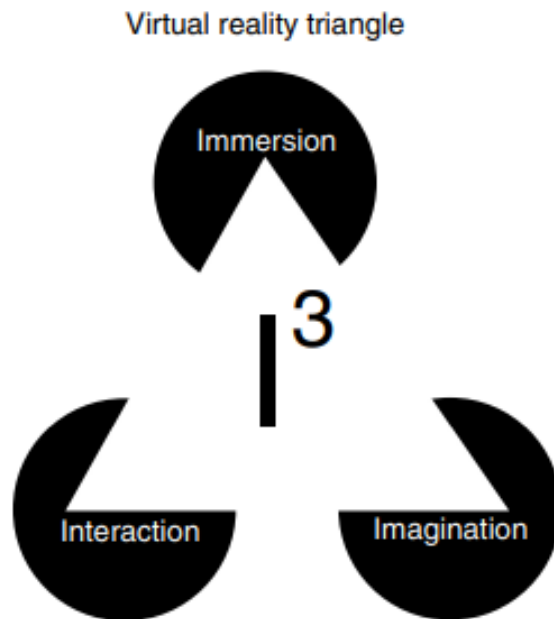
Tab. 2: Porovnání hasicích přístrojů

Vlastnost	Sněhový hasicí přístroj (CO ₂)	Práškový hasicí přístroj
Hasivo	Stlačený oxid uhličitý (CO ₂)	Jemný chemický prášek
Mechanismus účinku	Vytlačení kyslíku (udušení) a prudké ochlazení zasaženého místa	Obalení plamenů tenkou krustou (izolace od kyslíku) a přerušení reakce hoření
Vhodné pro hašení	Jemná elektronika, elektrická zařízení pod proudem, hořlavé kapaliny	Univerzální: pevné látky (textil, dřevo), kapaliny, plyny
Nevhodné pro hašení	Pevné hořlavé látky (dřevo, textil, papír) - nezabrání opětovnému vzplanutí	Počítače, televizory a další elektronika (riziko trvalého poškození vlivem koroze)
Přísný zákaz použití	Lehké alkalické kovy, hořlavý prach, sypké látky	Lehké alkalické kovy (pokud se nejedná o speciální prášek třídy D)

Hlavní výhoda	Nezanechává absolutně žádné stopy, nepoškozuje elektroniku, čistá práce	Vysoká účinnost na většinu materiálů, trvale zamezuje opětovnému vzplanutí
Hlavní nevýhoda	Riziko vzniku omrzlin při kontaktu s pokožkou, proud plynu může rozfoukat lehké hořící materiály	Prach je chemicky agresivní a těžko se uklízí, snižuje viditelnost a ztěžuje dýchání v uzavřených prostorách

1.3 Virtuální realita: Technologie a principy

Pro efektivní implementaci simulací do procesů krizového managementu je nezbytné nejprve vymezit samotný pojem virtuální reality (VR). V laické veřejnosti je VR často ztožňována pouze s hardwarem (brýlemi), avšak z odborného hlediska se jedná o komplexní rozhraní mezi člověkem a počítačem, které cílí na oklamání lidských smyslů. Nejuznávanější definici v akademickém prostředí formulovali Burdea a Coiffet ve své publikaci *Virtual Reality Technology*. Ti definují VR jako „špičkové uživatelské rozhraní, které zahrnuje simulaci v reálném čase a interakci prostřednictvím více smyslových kanálů.“ Pro pochopení funkčnosti VR systému definují autoři tzv. trojúhelník I³ (I-cube), jehož vrcholy představují tři nutné podmínky pro existenci virtuální reality, kde první je imerze (immersion) aneb schopnost technologie obklopit uživatele a izolovat jeho smysly od fyzického světa, je zajištěna primárně vizuálně (HMD headsetem), ale i zvukově (3D zvuk). Další podmínkou je interakce (Interaction), kde uživatel není pasivním pozorovatelem, ale může prostředí měnit. Klíčová je zde také odezva v reálném čase, takže pokud uživatel pohne hlavou nebo rukou, virtuální svět musí zareagovat okamžitě (s latencí pod 20 ms). Poslední podmínkou je imaginace (Imagination), aneb schopnost aplikace stimulovat kognitivní procesy uživatele. VR není jen kopií reality, ale nástrojem pro řešení problémů, které by v reálném světě byly neřešitelné nebo příliš nebezpečné. [1]



Obr. 4: Trojúhelník I3 definující základní složky VR [1]

1.3.1 Imerze

Pojem imerze je často zaměňován s prezencí, avšak Jason Jerald ve své publikaci *The VR Book* definuje jejich jasné oddělení, imerzi definuje jako objektivní vlastnost technologického systému. Jedná se o soubor fyzikálních parametrů hardwaru, které určují, jak věrně je systém schopen nahradit reálné smyslové vjemy těmi virtuálními. Míru imerze lze objektivně změřit a kvantifikovat, mezi klíčové parametry, které ji ovlivňují, patří dle Burdea a Coiffeta rozsah zorného pole (Field of View), lidské oko má horizontální zorné pole přibližně 200°. Současné běžné HMD (Head Mounted Displays) nabízejí FOV mezi 90° až 110°. Čím širší je FOV, tím méně uživatel vnímá tzv. efekt „potápěčských brýlí“, což zvyšuje míru imerze. Dalším parametrem je rozlišení a hustota pixelů (PPD), kde nízké rozlišení vede k tzv. Screen Door Effectu (efektu mřížky), který ruší iluzi reality. Pro čtení textů (např. evakuačních plánů ve VR) je nutné vysoké rozlišení. Další parametr je latence aneb časová prodleva mezi pohybem hlavy uživatele a překreslením obrazu. Pro zachování imerze musí být tato hodnota nižší než 20 ms. Vyšší latence nejen narušuje imerzi, ale vede k fyziologickým obtížím (kinetóze). Posledním parametrem je stereoskopie, jedná se o schopnost zobrazovat hloubku prostoru, což je klíčové pro odhad vzdálenosti při pohybu v zakouřeném prostředí. Lze tedy konstatovat, že imerze je „to, co technologie dělá“. Je to nutná podmínka pro kvalitní simulaci, nikoliv však postačující. [1]

1.3.2 Prezence

Zatímco imerze popisuje hardware, prezence (Presence) popisuje vnitřní stav uživatele. Jerald ji definuje jako subjektivní psychologický pocit „bytí tam“ (sense of being there). Je to

moment, kdy uživatelův mozek potlačí vědomí, že se nachází v reálné místnosti, a začne primárně reagovat na podněty z virtuálního prostředí. V kontextu bezpečnostního výcviku je prezence naprosto klíčovým faktorem, odborná literatura často rozlišuje dvě složky prezence, které jsou pro náš scénář relevantní, a to iluze místa (Place Illusion), aneb pocit, že se fyzicky nacházím v hořící budově (daný kvalitní grafikou a zvukem) a také iluze uvěřitelnosti (Plausibility Illusion), pocit, že se události dějí doopravdy a reagují na mě. Pokud se oheň šíří směrem ke mně a reaguje na mé hašení, mozek situaci vyhodnotí jako skutečnou hrozbu. Dosažení vysoké míry prezence má přímý dopad na fyziologické reakce uživatele. Výzkumy potvrzují, že pokud uživatel prožívá silnou prezenci během simulace požáru, vykazuje zvýšenou tepovou frekvenci, pocení a zrychlené dýchání, tedy symptomy reálného stresu, právě tento stav je pro trénink žádoucí, umožňuje totiž trénovat rozhodovací procesy pod tlakem. Pokud by uživatel prezenci nepocíťoval, choval by se jako ve videohře (racionálně, bez strachu), což by mělo pro nácvik reálné evakuace nulovou hodnotu. [1]

1.4 3D grafika a metody tvorby virtuálního prostředí

Třírozměrná počítačová grafika, označovaná jako 3D grafika se zabývá digitálním zobrazením geometrických dat v třírozměrném eukleidovském prostoru za účelem generování dvojrozměrného obrazu. Na rozdíl od grafiky dvourozměrné pracuje 3D grafika s matematickou reprezentací objektů, které jsou definovány souřadnicemi na třech osách: X (šířka), Y (výška) a Z (hloubka). Základním stavebním kamenem těchto objektů jsou body v prostoru (vertexy), které jsou vzájemně propojeny hranami a vytvářejí tak základní plošky, nejčastěji trojúhelníky nebo čtyřúhelníky. Spojením těchto plošek vzniká polygonální síť (mesh), která definuje vnější tvar virtuálního objektu. Aby byl tento matematický model transformován do výsledného obrazu vnímatelného lidským okem, musí být podroben procesu výpočtu osvětlení, stínů a povrchových textur, což je proces označovaný jako rendering.

Historické kořeny 3D grafiky sahají do šedesátých let dvacátého století, kdy Ivan Sutherland v roce 1963 vyvinul systém Sketchpad, který položil základy pro počítačem podporované navrhování (CAD) a interaktivní počítačovou grafiku. Skutečné centrum vývoje rané 3D grafiky se však v sedmdesátých letech zformovalo na University of Utah. Zde byly vyvinuty klíčové algoritmy pro odstraňování skrytých povrchů, a především metody stínování polygonálních sítí, jako je Gouraudovo stínování z roku 1971 a Phongovo stínování z roku 1975, které umožnily hladké zobrazování zaoblených povrchů. V průběhu osmdesátých a devadesátých let došlo k masivnímu rozvoji díky vzniku specializovaných grafických stanic a softwarových standardů, jako bylo rozhraní OpenGL nebo renderovací systém RenderMan. Tento vývoj byl završen nástupem dedikovaných grafických akcelerátorů (GPU), které přesunuly složité matematické výpočty z hlavního procesoru na specializovaný hardware, což umožnilo výpočet 3D grafiky v reálném čase a otevřelo cestu pro moderní simulace ve virtuální realitě. [9]

1.4.1 Současné metody tvorby virtuálního prostředí

V současnosti je tvorba virtuálního prostředí pro potřeby facility managementu a krizového plánování realizována několika odlišnými metodologickými přístupy, které se liší časovou náročností, vizuální věrností a výpočetní efektivitou. Prvním tradičním přístupem je ruční modelování 3D objektů. Tento proces spočívá v manuální tvorbě geometrie, textur a materiálů grafikem ve specializovaných softwarových nástrojích, jako je Blender nebo Autodesk Maya. Hlavní výhodou ručního modelování je absolutní kontrola nad výslednou topologií a architekturou polygonální sítě. Vývojář může přesně kontrolovat počet polygonů a optimalizovat objekt pro plynulý běh na Standalone VR zařízeních. Nevýhodou je však značná časová a finanční náročnost, zejména při požadavku na vytvoření rozsáhlých a detailních interiérů budov.

Další metodou je digitalizace reálného prostředí, která se pro účel této simulace velmi hodí, a tak bude ještě více rozebrána, a u které dochází i k propojení této technologie a jejímu vylepšení další metodou, a to velmi moderním a progresivně se rozvíjícím směrem generovaných modelů s využitím umělé inteligence. Tento přístup využívá hluboké neuronové sítě a generativní algoritmy, které jsou schopny na základě textového popisu nebo jediné zdrojové fotografie automaticky vytvořit trojrozměrnou geometrii včetně textur. Do této oblasti spadají také pokročilé metody volumetrického zobrazování, jako jsou neuronová pole zářivosti (NeRF) nebo technologie 3D Gaussian Splatting, které dokážou generovat vysoce věrné 3D scény ze sady běžných fotografií bez nutnosti klasického polygonálního modelování. Výhodou je extrémní rychlost generování dat, avšak nevýhodou zůstává horší kvalita výsledné topologie sítě a obtížná implementace interaktivních fyzikálních vlastností do takto vygenerovaných objektů. [10]

1.5 Metody digitalizace reálného prostředí

Pro potřeby Facility Managementu je žádoucí vytvořit věrnou kopii skutečného pracoviště, tzv. digitální dvojče. Trénink v prostředí, které zaměstnanci důvěrně znají, zvyšuje přenositelnost návyků do reality. Místo manuálního modelování se v současnosti využívají metody automatizovaného skenování prostoru.

1.5.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda rekonstrukce 3D tvarů a textur z velkého množství 2D fotografií pořízených z různých úhlů, tyto fotografie následně zpracovávají softwarové algoritmy jako např. RealityCapture nebo Polycam, které analyzují paralaxu mezi snímky a vypočítávají hloubku prostoru. Výhodami tohoto postupu jsou fotorealistické kvality textur, kde k pořízení dat stačí běžný digitální fotoaparát nebo kvalitní smartphone. Co je pro navrhované řešení ale největší nevýhodou je že výsledek fotogrammetrie je často geometrie s miliony polygonů, která je pro přímé použití v Standalone VR nepoužitelná a vyžaduje drastickou optimalizaci. Metoda také selhává u lesklých povrchů (sklo, zrcadla) a jednobarevných stěn bez textury.[17]



Obr. 5: Hasící přístroj zachycený fotogrammetrií

zdroj: XRLAB UTB



Obr. 6: Místnost zachycená fotogrammetrií

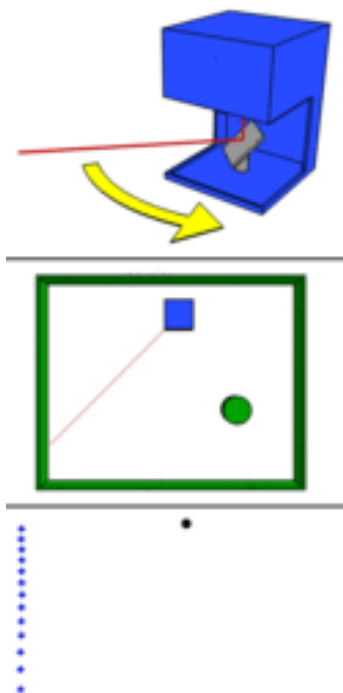
zdroj: XRLAB UTB

1.5.2 LiDAR a laserové skenování

Druhou metodou je laserové skenování, jedná se o přesný sken prostor využívající technologie LiDAR (Light Detection and Ranging). Ta funguje na principu vysílání laserových paprsků a měření času jejich odrazu a je pro tento účel možno využít stacionární skenery či nyní i moderní telefony co mají LiDAR zabudovaný. Na rozdíl od fotogrammetrie poskytuje LiDAR velmi přesné rozměrové informace (Měřítko 1:1), což je pro bezpečnostní plány ideální. Pro využití v navrhovaném scénáři by bylo nejspíše nejrozmumnější využití mobilního LiDARu pro získání hrubého tvaru místnosti (stěny, strop, podlaha) a následné manuální vložení detailních modelů nábytku. [18]



Obr. 7: LiDAR scanner XGRIDS Lixel L2 PRO [22]



Obr. 8: Jednoduchá ukázka LiDARu [14]

1.5.3 Problémy pro výpočetní techniku

V případě obou metod surová data z fotogrametrie ani LiDARu nelze přímo importovat do herního enginu pro Standalone VR, jelikož sken místnosti může obsahovat desítky milionů polygonů, což by takové brýle nezvládli. Proto je nezbytný proces zvaný retopologie nebo

Scan-to-BIM. V tomto procesu slouží naskenovaný model pouze jako 3D šablona, kterou musí následně ještě grafik dohladit pomocí optimalizovaných modelů stěn a nábytku. Tím vznikne vizuálně věrná, ale výpočetně nenáročná kopie, která umožňuje plynulý běh simulace [19]

1.5.4 Neuronová pole zářivosti (NeRF) a 3D Gaussian Splatting

V posledních letech se v oblasti digitalizace reálného prostředí prosadila skupina metod označovaných jako neuronová pole zářivosti (Neural Radiance Fields, NeRF). Zatímco klasická fotogrammetrie i laserové skenování pracují s explicitní polygonální geometrií, NeRF reprezentuje scénu implicitně pomocí neuronové sítě, která se učí mapovat prostorové souřadnice bodu a směr pozorování na hustotu a barvu. Jinými slovy, místo uložení trojúhelníků a textur je scéna zakódována v parametrech modelu, jenž je schopen pro libovolný paprsek vypočítat, jakou barvu by měl daný paprsek při průchodu scénou nést. Výhodou tohoto přístupu je velmi vysoká vizuální věrnost, zejména v komplexních scénách s jemnými detaily a složitým osvětlením, a relativně nízká náročnost na manuální přípravu dat – při vhodném nasnímání lze z běžné série fotografií vytvořit konzistentní trojrozměrnou reprezentaci prostředí. Nevýhodou je naopak vysoká výpočetní náročnost při vykreslování v reálném čase a obtížná integrace explicitní interaktivity, neboť scéna nemá přirozeně definovanou polygonální topologii vhodnou pro kolize či fyzikální simulaci.

Na NeRF navazuje novější technika označovaná jako 3D Gaussian Splatting, která se snaží skloubit výhody implicitních a explicitních reprezentací. Scéna je v tomto případě popsána souborem trojrozměrných Gaussových funkcí („splatů“), z nichž každá má definovanou polohu, orientaci, velikost a optické vlastnosti. Při vykreslování je obraz vytvářen projekcí a skládáním těchto gaussianů do výsledného snímku. Oproti klasickému NeRF umožňuje Gaussian Splatting významně zrychlit rekonstrukci i renderování, což z něj činí perspektivní technologii pro aplikace v rozšířené a virtuální realitě. Z hlediska tréninkových simulací má však tato metoda podobná omezení jako čistý NeRF: generovaná scéna je primárně určena k vizuálnímu zobrazení a méně se hodí pro detailní interakci s objekty (například přesné uchopení hasicího přístroje, kolize částic hasiva nebo destrukci objektů). V kontextu navrhovaného simulátoru požární evakuace proto tyto metody představují spíše doplňkovou možnost pro rychlou tvorbu statického pozadí (například fotorealistického interiéru), zatímco klíčové interaktivní prvky (hasicí přístroje, dveře, přepínače) je stále vhodné modelovat konvenční polygonální metodou v kombinaci s fyzikálním enginem. [21]



Obr. 9: Atrium UTB, metoda Gaussian splatting

zdroj: XRLAB UTB



Obr. 10: Tetry metoda Gaussian splatting

zdroj: XRLAB UTB

2 Analýza technologií pro tvorbu simulací

Cílem této kapitoly je identifikovat a porovnat současné hardwarové a softwarové prostředky, které jsou nezbytné pro tvorbu a provoz tréninkových simulací. Pro pochopení současných limitů a možností technologie je však nezbytné nejprve stručně zmapovat její historický vývoj, neboť právě evoluce zobrazovacích panelů a senzorů umožnila přechod od teoretických konceptů k prakticky využitelným nástrojům.

2.1 Historický vývoj a evoluce VR zařízení

Ačkoliv je virtuální realita často vnímána jako fenomén 21. století, její kořeny sahají hluboko do poloviny století dvacátého. Touhu člověka po úniku do umělého světa lze sledovat již v panoramatických malbách 19. století, avšak technologický počátek datujeme do 50. a 60. let 20. století.

2.1.1 Pionýrská éra (1950-1970)

Za duchovního otce imerzních simulátorů je považován Morton Heilig, který v roce 1962 patentoval zařízení zvané Sensorama. Nejednalo se o digitální počítač, ale o mechanické zařízení připomínající herní automat, které uživateli promítalo stereoskopický film (např. jízdu na motorce), doplněný o vítr (ventilátory), vibrace sedadla, či dokonce i pachy. Heilig tím předběhl dobu konceptem tzv. multimodální stimulace, která je dodnes cílem nejvyspělejších simulátorů. [1]



Obr. 11: Prototyp simulátoru Sensorama [1]

Skutečný zlom v oblasti Head-Mounted Displays (HMD) přišel v roce 1968, kdy Ivan Sutherland na univerzitě v Utahu sestrojil první náhlavní soupravu připojenou k počítači. Zařízení, přezdívané Damoklův meč (Sword of Damocles), bylo tak těžké, že muselo být zavěšeno na stropním rameni, aby uživateli nezlomilo vaz. Ačkoliv zobrazovalo pouze drátěné modely (wireframe) jednoduchých krychlí, zavedlo klíčový princip sledování pohybu hlavy (Head Tracking), kdy obraz se měnil podle toho, kam se uživatel díval. [1]



Obr. 12: Damoklův meč Ivana Sutherlanda [1]

2.1.2 Období popularity a zklamání (1980-1990)

V 80. letech zpopularizoval termín „Virtuální realita“ Jaron Lanier, zakladatel společnosti VPL Research, která začala prodávat první komerční brýle (EyePhone) a datové rukavice. Tyto systémy však stály desítky tisíc dolarů a byly určeny primárně pro NASA a armádu. V 90. letech se o průnik do domácností pokusily herní firmy (např. SEGA VR, Nintendo Virtual Boy), avšak tyto pokusy skončily fiaskem, důvodem byla technologická nezralost, brýle měli nízké rozlišení, vysokou latenci způsobující kinetózu a monochromatické (červenobílé) displeje. Toto selhání vedlo k období nedůvěry investorů a vývoj se stáhl zpět do výzkumných laboratoří. [1]



Obr. 13: Nintendo Virtual Boy [11]

2.1.3 Moderní doba (2012 - současnost)

Zásadní obrat nastal v roce 2012 s kampaní Palmera Luckeyho na platformě Kickstarter. Jeho prototyp Oculus Rift využil levné komponenty z mobilních telefonů (akcelerometry, displeje s vysokou hustotou pixelů) a vyřešil problém s latencí. To odstartovalo novou éru. V roce 2016 vstoupily na trh první plnohodnotné spotřebitelské systémy (HTC Vive, Oculus Rift CV1), které umožnily sledování pohybu v prostoru (6-DOF). Zlomovým bodem pro podnikovou sféru a facility management se však stal až rok 2019 a vydání headsetu Oculus Quest. Toto zařízení jako první odstranilo nutnost kabelového připojení k PC (tzv. Standalone VR), čímž se otevřela cesta k masovému nasazení při školeních v běžných prostorách.

V posledních letech je vývoj v oblasti virtuální reality charakterizován výrazným trendem miniaturizace optických a hardwarových komponentů. Hlavním technologickým posunem v tomto směru je postupný přechod od tradičních, objemných Fresnelových čoček k

pokročilé pancake optice. Tato technologie funguje na principu opakovaného odrazu světla uvnitř optického bloku, což umožňuje výrazně zkrátit vzdálenost mezi samotným displejem a okem uživatele. Výsledkem je zásadní redukce předního profilu headsetů a celkové zmenšení konstrukce náhlavních souprav. Tento evoluční krok je jasně patrný na produktové řadě autonomních zařízení společnosti Meta. U modelu Meta Quest 3 bylo díky integraci pancake optiky dosaženo o 40 % štíhlejšího těla optického profilu ve srovnání s předchozí generací. Miniaturizace těla přístroje má přímý pozitivní dopad na ergonomii, jelikož se těžiště zařízení posouvá blíže k obličeji uživatele. Tím se výrazně snižuje namáhání krční páteře a je eliminován dřívější pocit převažování headsetu dopředu, což je klíčové pro zachování pohodlí při dlouhodobých tréninkových simulacích.

Souběžně se zmenšováním fyzických rozměrů dochází také k proměně vstupních prvků a sensorové výbavy. Novější ovladače, jako jsou Meta Quest Touch Plus, již postrádají dřívější masivní sledovací prstence (tracking rings), což usnadňuje manipulaci v těsné blízkosti těla a snižuje riziko nechtěného střetu ovladačů. Fyzické zmenšování hardwaru navíc neprobíhá na úkor výkonu; do subtilnějších konstrukcí jsou integrovány pokročilejší čipy s vyšší hustotou výpočetního výkonu a soustavy vnějších kamer, které umožňují nejen přesný prostorový tracking, ale také plynulý přechod z čisté virtuální reality do reality smíšené prostřednictvím barevného video průchodu. [1]



Obr. 14: Oculus Quest [12]



Obr. 15: Meta Quest 3

2.2 Architektura PC-VR (Tethered Systems)

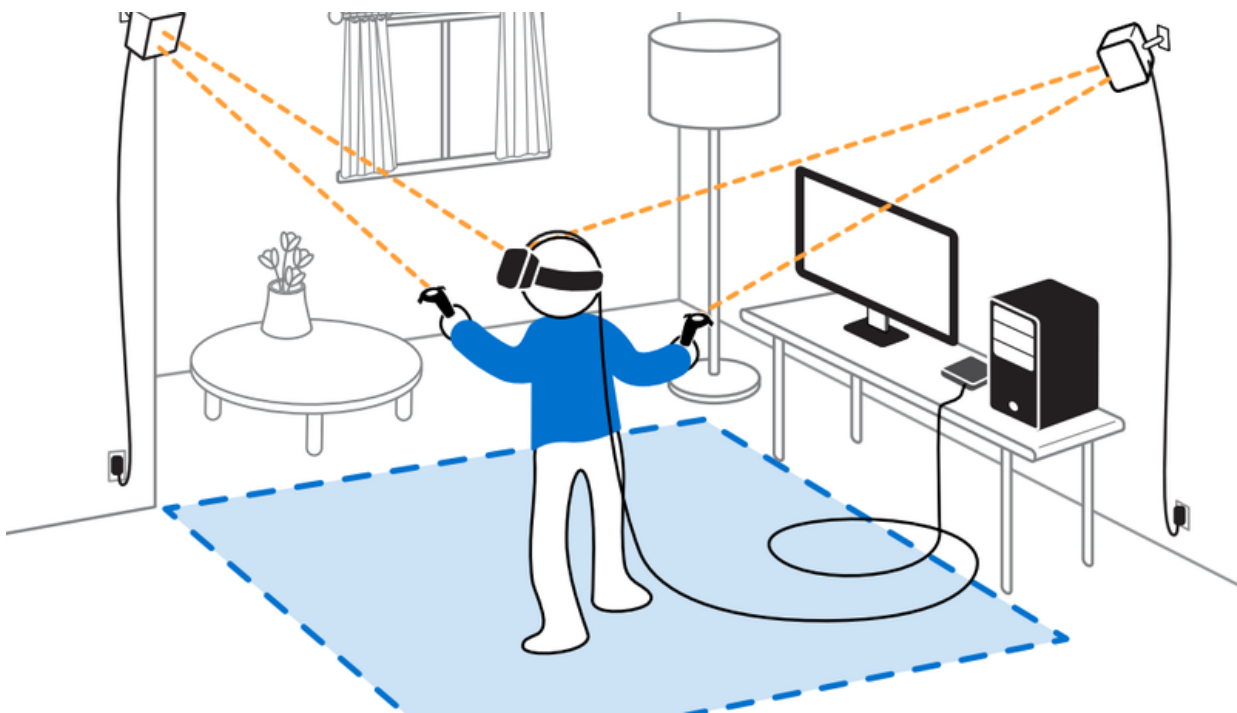
Předtím než se podíváme na zmíněné Standalone VR tak ještě odbočíme k PC-VR, které ještě v minulém desetiletí na trhu převládalo. Do této kategorie spadají zařízení jako HTC Vive, Valve Index či již zmíněná starší generace Oculus Rift. Z technického hlediska funguje headset v této konfiguraci pouze jako zobrazovací periferie (displej) a soustava senzorů a veškeré výpočetní operace probíhají na externě na výkonném počítači vybaveném dedikovanou grafickou kartou (GPU). Data jsou následně přenášena do brýlí pomocí kabelu (HDMI/DisplayPort a USB). [1]

2.2.1 Výkon a grafická fidelita

Hlavní předností této architektury je prakticky neomezený výpočetní výkon. Díky využití desktopových grafických karet lze ve virtuálním prostředí vykreslovat scény s vysokým počtem polygonů, texturami ve vysokém rozlišení a pokročilými světelnými efekty (Ray Tracing). V kontextu bezpečnostních simulací by mohl být tento výkon zásadní pro věrné zobrazení fyzikálních jevů, které provázejí mimořádné události jako například realistický kouř, který reaguje na světlo a pohyb vzduchu, je výpočetně extrémně náročný, dále také dynamické osvětlení, které by se hodilo u simulace výpadku proudu a orientace pouze díky světlu nouzových svítidel, která mohou vyžadovat komplexní výpočty stínů v reálném čase. [1]

2.2.2 Nevýhody pro facility management

Navzdory všem vizuálním výhodám naráží PC-VR při praktickém nasazení ve firmách na zásadní limity, kde jedním z hlavních je fyzické omezení kabelem, přítomnost kabelu, který spojuje uživatele s počítačem, představuje v kontextu nácviku evakuace bezpečnostní riziko. Pokud má uživatel trénovat rychlý únik, hrozí zamotání do kabelu či zakopnutí, tomuto problému se dá částečně vyhnout s PC-VR bezdrátovými headsety, u kterých i tak převážně zůstávají další nevýhody, a navíc jejich použití může znamenat zvýšení latence což je pro navrhované účely také nežádoucí. Dalším problémem může být logistická náročnost, jelikož provoz mnoha PC-VR headsetů vyžaduje instalaci tzv. Lighthouse stanic (laserových vysílačů pro tracking) do rohů místnosti a kalibraci herního prostoru, to je pro facility managera, který chce provést rychlé školení časově neefektivní. V neposlední řadě je nevýhodou i cena, náklady na pořízení zahrnují nejen headset, ale i výkonný počítač což zvyšuje vstupní investici.



Obr. 16: PC-VR zapojené drátově [13]

2.3 Architektura Standalone VR

Revoluci v dostupnosti VR přinesl nástup zmíněných Standalone VR systémů, reprezentovaných především řadou Meta Quest, Pico nebo HTC Vive Focus. Tato zařízení představují posun od periferního zařízení k plnohodnotnému počítači integrovanému přímo v náhlavní soupravě. [1]

2.3.1 Technická specifikace a Inside-Out tracking

Srdcem těchto zařízení je mobilní procesor, nejčastěji na bázi architektury ARM (např. Qualcomm Snapdragon řady XR). Headset obsahuje vlastní baterii, úložiště i operační systém (zpravidla na bázi Androidu). Klíčovou inovací, která umožnila masové rozšíření, je technologie Inside-Out Tracking. Na rozdíl od PC-VR, které vyžaduje externí laserové stanice, využívá Standalone VR sadu kamer integrovaných přímo na brýlích. Tyto kamery snímají okolní prostor a pomocí algoritmů počítačového vidění SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) v reálném čase vypočítávají polohu uživatele v prostoru. Tato technologie přináší pro objektovou bezpečnost několik zásadních výhod jako absolutní volnost pohybu, kde díky absenci kabelů umožňuje bezpečný nácvik chůze, otáčení a manipulace s předměty (hasicí přístroj) v rozsahu 360°. Další výhodou je rychlé nasazení, kde zařízení stačí nasadit a během několika sekund definovat bezpečnostní zónu. Školení tak může probíhat v jakémkoliv volné místnosti či chodbě bez nutnosti instalace stanic. [1]



Obr. 17: Meta Quest 3 s označenými kamerami [14]

2.3.2 Výkonnostní limity a optimalizace

Daní za mobilitu je výrazně nižší výpočetní výkon ve srovnání s PC. Mobilní čip nedokáže zpracovat stejné množství geometrie a efektů jako stolní počítač což pro vývojáře tréninkového scénáře znamená nutnost optimalizace, aneb zjednodušení grafiky, kde místo fotorealistických textur se využívají zjednodušené materiály. Dále je také potřeba efektivnější práce s částicemi, kde simulace kouře nemůže být fyzikálně přesná či tak kvalitní jako u PC-VR headsetů, ale využívá se různých vizuálních efektů, které iluzi kouře vytvoří s minimálním dopadem na výkon. I přes tato omezení se Standalone VR jeví jako ideální platforma pro účely tréninku, jelikož prioritou u těchto simulací není nutně dokonalý fotorealismus, ale především plynulost a interaktivita, kterou moderní Standalone headsety splňují. [1]

2.4 Vstupní zařízení a metody interakce

Kromě vizuální stránky je pro věrnost simulace klíčový způsob, jakým uživatel s virtuálním prostředím manipuluje (např. otevírání dveří, uchopení hasicího přístroje). Volba vstupního zařízení zásadně ovlivňuje tzv. křivku učení (Learning Curve).

2.4.1 Standardní VR ovladače

Většina současných systémů (PC-VR i Standalone) je standardně dodávána s párem 6-DOF ovladačů (např. Meta Touch). Tyto ovladače jsou trackovány stejným systémem jako headset a nabízejí fyzická tlačítka, joysticky a analogové spouště, výhodou je haptická odezva (Haptic Feedback), kde díky vibračním motorkům může uživatel cítit zmáčknutí spouště hasicího přístroje, náraz nebo třeba vybrací při dotyku ohně. Držení ovladače v ruce navíc simuluje rukojeť nástroje (tzv. Proprioception), což dodává pocit váhy. Nevýhodou tohoto přístupu ale je, že pro netechnické uživatele jsou ovladače neintuitivní a uživatel se tak musí učit, které tlačítko slouží k uchopení a které k interakci, což v krizové situaci odvádí pozornost od řešení problému. [1]



Obr. 18: Ovladače Meta Quest Touch Plus [14]

2.4.2 Optické sledování rukou (Hand Tracking)

Moderní Standalone headsety (např. Meta Quest 3) umožňují díky pokročilým algoritmům počítačového vidění (Computer Vision) a umělé inteligenci sledovat ruce uživatele bez nutnosti držet jakýkoliv hardware. Kamery snímají polohu kloubů prstů a v reálném čase vytvářejí virtuální model ruky. Dle Burdea představuje přímá interakce rukou nejpřirozenější formu vstupu (Natural User Interface) a to především díky intuitivnosti, kde pro otevření dveří uživatel prostě natáhne ruku a stiskne kliku a nemusí tak přemýšlet nad tlačítky což je pro evakuační trénink ideální. Další výhodou může být o něco snazší hygiena, jelikož při hromadném školení odpadá nutnost dezinfikovat ovladače mezi účastníky a nemusí se řešit výdrž baterie ovladače. Jako jednou z nevýhod je absence haptické odezvy, kde uživatel „sahá do prázdna“, kde, pokud ve VR uchopí kliku, jeho ruka jí ve skutečnosti projde, což může narušit imerzi. Přes všechny tyto nedostatky bude ale pro účely navrhované simulace stejně lepší použití Hand Trackingu a to hlavně kvůli již zmíněné intuitivnosti. [1]



Obr. 19: Meta Quest 3 Hand Tracking [16]

3 Virtuální tréninkový simulátoru pro oblast bezpečnosti

V této kapitole jsou definovány základní stavební kameny nezbytné pro návrh a následný vývoj modelového tréninkového scénáře ve virtuální realitě. Před samotným popisem technické implementace je nutné přesně specifikovat záměr celého výukového programu, vymezit hranice simulovaného prostředí a stanovit klíčové technické i uživatelské požadavky, které musí vyvíjený systém splňovat. Tato specifikace slouží jako přímé zadání pro programovou logiku popsanou v následující části práce.

3.1 Cíle tréninkového scénáře

Hlavním edukačním cílem navrženého scénáře je transformace teoretických znalostí z oblasti požární ochrany do praktických dovedností uživatele v bezpečném simulovaném prostředí. Trénink je zaměřen na nácvik správného rozhodovacího procesu pod tlakem mimořádné události. V rámci behaviorálních cílů je kladen důraz na eliminaci panického chování a na fixaci správné posloupnosti kroků při detekci požáru. Mezi dílčí cíle se řadí osvojení si zručnosti při manipulaci s hasicím přístrojem, což zahrnuje jeho správné uchopení, vytažení zajišťovací pojistky a směrování proudu hasiva na ohnisko požáru. Kritickým kognitivním cílem je schopnost okamžité analýzy hořícího materiálu a volba adekvátního hasicího přístroje (sněhového či práškového), což je přímo navázáno na minimalizaci následných škod na majetku. Posledním cílem je fixace zásady, že po úspěšném utlumení lokálního požáru je nutné prostor opustit únikovým východem a přivolat odbornou pomoc.

3.2 Rozsah modelového scénáře

Rozsah simulace je situován do vnitřního prostoru administrativní kanceláře s typickým vybavením, jako je pracovní stůl, výpočetní technika a okno s textiliemi. Tento věcný rozsah byl zvolen záměrně z důvodu modelového výskytu dvou odlišných tříd požáru na jednom místě. Konkrétně se jedná o požár elektrického zařízení pod proudem a požáru pevných organických látek. Z hlediska prostorového omezení se scénář zaměřuje výhradně na řešení lokálního požáru v raném stádiu zahoření, kdy je situace ještě zvládnutelná pomocí přenosných hasicích přístrojů. Simulace tudíž nezahrnuje rozsáhlé fáze plně rozvinutého požáru, zborcení stavebních konstrukcí ani komplexní evakuaci vícepatrových budov. Samotný fyzikální model únikových dveří je zjednodušen pro potřeby plynulé interakce ve virtuální realitě a nesleduje exaktní stavební normy certifikovaných požárních uzávěrů, čímž je zachován hlavní důraz na nerušený uživatelský zážitek a logické uzavření celého scénáře.

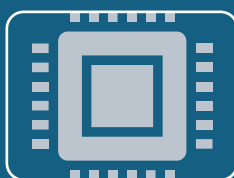
3.3 Klíčové požadavky na systém

Požadavky na vytvoření tréninkového scénáře jsou rozděleny do tří základních kategorií, a to na požadavky:



Funkční požadavky

- Interaktivita
- Logika



Technické požadavky

- Integrace
- Stabilita



Požadavky na uživatelské prostředí

- Dynamičnost
- Zřetelnost

Mezi funkční požadavky je řazena nutnost plné interaktivity klíčových objektů ve scéně. Hasicí přístroje musí spolehlivě reagovat na úchop, vytažení pojistky a stisknutí spouště. Hořící objekty musí disponovat proměnnou reprezentující intenzitu hoření, která průběžně a dynamicky reaguje na aplikaci hasiva. Dále je vyžadována implementace logické podmínky pro vyhodnocení stavu obou ohnisek, kdy je úspěšné dokončení scénáře a následné odblokování únikového východu podmíněno kompletním uhašením všech zdrojů požáru.

Technické požadavky zahrnují nezbytnou integraci částicových systémů pro vizuální zobrazení plamenů, kouře a proudu hasiva vycházejícího z trysky. Kritickým požadavkem je spolehlivá implementace detekce kolizí metodou vržení paprsku, kterou je v reálném čase ověřováno, kam uživatel proud hasiva směřuje. Systém materiálů použitých u 3D modelů musí podporovat dynamické změny textury, jako je postupné zčernání povrchu, striktně v závislosti na délce působení tepla. Z hlediska specifik platformy virtuální reality je absolutní prioritou stabilní udržení vysoké snímkové frekvence pro zamezení kinetózy u uživatelů a také korektní výpočet výšky kamery vůči podlahovému sledování pohybu.

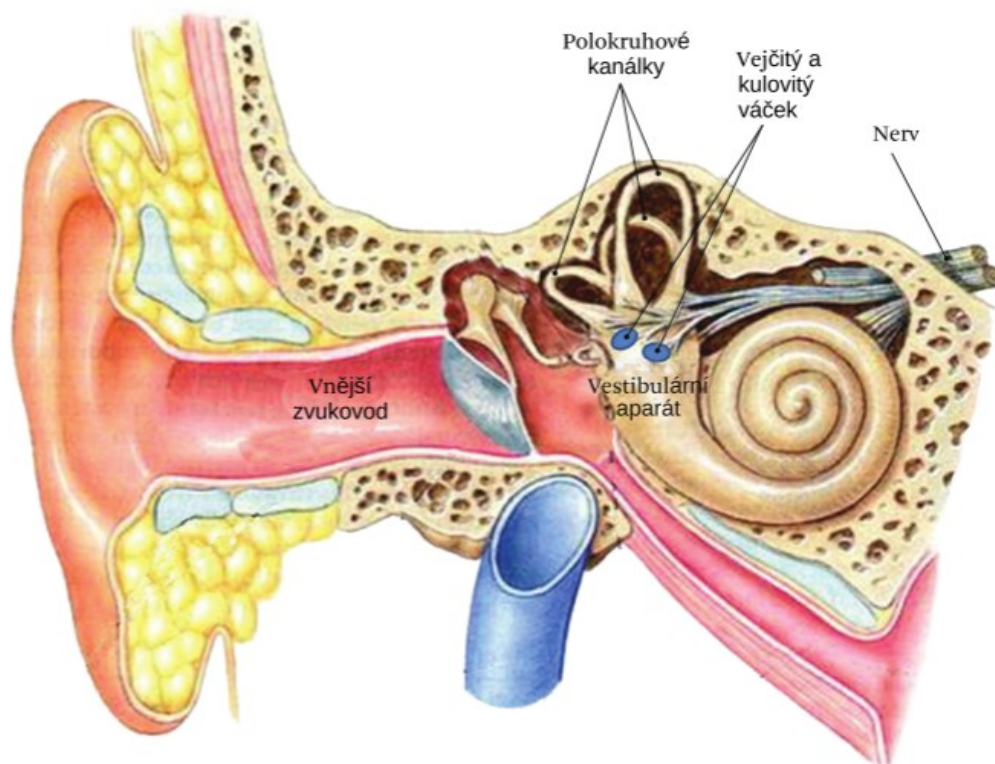
V oblasti uživatelského rozhraní je stanoven požadavek na přítomnost dynamického informačního panelu začleněného přímo do 3D prostoru. Tento panel musí pohotově reagovat na chybné chování uživatele a zobrazovat interaktivní edukační varování. Zobrazení textu musí být omezeno pouze na vymezený časový interval, aby nedocházelo k trvalému narušení vizuálního vnímání scény. Veškeré textové pokyny musí být zřetelně čitelné z běžné herní vzdálenosti a všechny interakční prvky, jako jsou kliky, hadice či pojistky, musí vizuálně nebo fyzicky indikovat svou uchopitelnost.

3.4 Zdravotní aspekty a fyziologické limity uživatele

Při návrhu virtuálního prostředí pro školení zaměstnanců je nezbytné zohlednit fyziologické limity lidského těla. Ignorování těchto faktorů může vést k rychlému nástupu již zmíněné kinetózy, což by mohlo negovat edukativní přínos celé simulace. Pro pochopení příčin tohoto stavu musíme analyzovat funkci vestibulárního aparátu, který dle Jasona Jeralda nefunguje pouze jako centrum rovnováhy, ale především i podobně jako soustava vysoce citlivých mechanických detektorů pohybu. [16]

3.4.1 Vestibulární systém jako senzor pohybu

Anatomicky se tento systém dělí na dvě funkční podjednotky, jejichž činnost lze přirovnat k technickým sensorům. První část tvoří vejčitý a kulovitý váček, které fungují jako biologický akcelerometr, tyto orgány měří lineární zrychlení, například při rozjezdu výtahu či automobilu, a reagují téměř okamžitě na změnu rychlosti. Druhou klíčovou částí jsou polokruhové kanálky, které plní funkci gyroskopu a detekují rotační pohyby hlavy. [16]



Obr. 20: Anatomické schéma vnitřního ucha [16]

Klíčovým problémem při simulaci pohybu ve virtuální realitě je specifická citlivost těchto orgánů. Odborná literatura uvádí, že polokruhové kanálky jsou nejcitlivější na frekvence v rozsahu 0,1 Hz až 5,0 Hz, tento rozsah není náhodný, ale evolučně odpovídá frekvenci pohybů lidské hlavy při přirozené chůzi (1-2 Hz) a běhu (3-6 Hz). Pokud je uživatel

ve virtuálním prostředí nucen k pohybu pomocí joysticku, dochází k nebezpečnému senzorigickému konfliktu, zatímco vizuálně oči hlásí pohyb odpovídající frekvenci chůze, vestibulární aparát ve vnitřním uchu zůstává v klidu a nedetekuje očekávané zrychlení. Mozek vyhodnocuje tento nesoulad mezi zrakem a rovnovážným ústrojím jako halucinaci, což může spustit obrannou reakci organismu v podobě nevolnosti. [16]

3.4.2 Eliminace rizik a volba metody pohybu

Z výše uvedených informací vyplývá, že snaha o simulaci plynulé chůze bez fyzického pohybu uživatele může být z fyziologického hlediska problematická. Pro navrhovaný tréninkový scénář tedy zvolíme metodu teleportace, která tento problém efektivně eliminuje. Teleportace uživatele přemístí skokově z bodu A do bodu B, čímž zcela obchází fázi virtuální akcelerace, která by dráždila vestibulární aparát, díky tomu zůstává senzorigický vstup z očí a uší v souladu, což umožňuje absolvovat školení i osobám s vyšší citlivostí na kinetózu. Dalším významným faktorem pro snížení rizika nevolnosti je právě využití technologie Hand Tracking namísto klasických ovladačů což je další výhodou již zmiňované technologie. Použití vlastních rukou navíc zvyšuje míru propriocepce, tedy již zmíněnou schopnost vnímat polohu vlastního těla, díky tomu, že virtuální ruka ve scénáři kopíruje pohyb skutečné ruky naprosto přesně, mozek snáze akceptuje virtuální realitu jako uvěřitelnou a nedochází k tak výrazné kognitivní zátěži jako při ovládání přes ovladače [16]

3.5 Rozdělení virtuálních tréninkových scénářů podle komplexity

Při implementaci virtuální reality pro tréninkové účely je potřeba si uvědomit, že ne každý edukační cíl vyžaduje vytvoření rozsáhlého a technologicky náročného světa. Návrh virtuálního prostředí a míra jeho interaktivity by měly vždy striktně odpovídat požadovaným učebním výstupům. Jak uvádí Alinier (2007) ve svém článku o teorii designu výukových simulací, interaktivní scénáře lze z hlediska technologické a environmentální věrnosti zařadit od jednoduchých trenažérů dílčích úkonů (part-task trainers) až po komplexní plnohodnotná prostředí (full-scale simulations). Toto dělení úzce souvisí s typologií výukových cílů ve virtuální realitě, kde Howard (2021) zmiňuje, že virtuální realita vyžaduje zcela odlišný design v závislosti na tom, zda je cílem automatizace základních motorických úkonů, nebo nácvik složitějších kognitivních procesů a rozhodování ve stresových situacích. Na základě těchto přístupů, lze interaktivní simulace pro účely facility managementu rozdělit do tří základních úrovní komplexity.

První a vývojářsky nejdostupnější úroveň představují takzvané jednoduché úkonové scénáře. Tyto aplikace jsou prostorově velmi omezené, často se odehrávají pouze na jednom statickém místě a nevyžadují od uživatele lokomoci, tedy pohyb v prostoru. Hlavním výukovým cílem je zde budování svalové paměti a automatizace jednoho konkrétního rutinního úkonu, což přesně odpovídá nácviku motorických dovedností. Typickým příkladem může být trénink odebírání výrobku z běžícího dopravníkového pásu, správné nasazení osobních ochranných pracovních prostředků nebo identifikace vadného kusu materiálu. Kognitivní zátěž uživatele je v tomto případě nízká, jelikož scénář má striktně lineární průběh a jeho

technické zpracování klade naprosto minimální nároky na výpočetní výkon samotného headsetu.

Druhou, výrazně náročnější úroveň tvoří komplexní situační scénáře, do kterých spadá i modelová situace navrhovaná v rámci této práce. Zde se již uživatel musí aktivně pohybovat v širším virtuálním prostředí a řešit sérii na sebe navazujících problémů, což představuje významnou zátěž pro jeho kognitivní a rozhodovací funkce. Většinou se jedná o scénáře s větveným dějem, kde každé rozhodnutí uživatele ovlivňuje další vývoj situace. Příkladem je nácvik likvidace počínajícího požáru, kdy zaměstnanec musí nejprve správně vyhodnotit typ ohrožení, vybrat vhodný druh hasicího přístroje, aplikovat správný mechanický postup hašení a následně se zorientovat v zakouřeném prostoru při evakuaci. Tyto scénáře vyžadují pokročilé sledování rukou pro jemnou motoriku a implementaci realistické fyziky, jako je například šíření ohně a dynamické chování částicových efektů kouře.

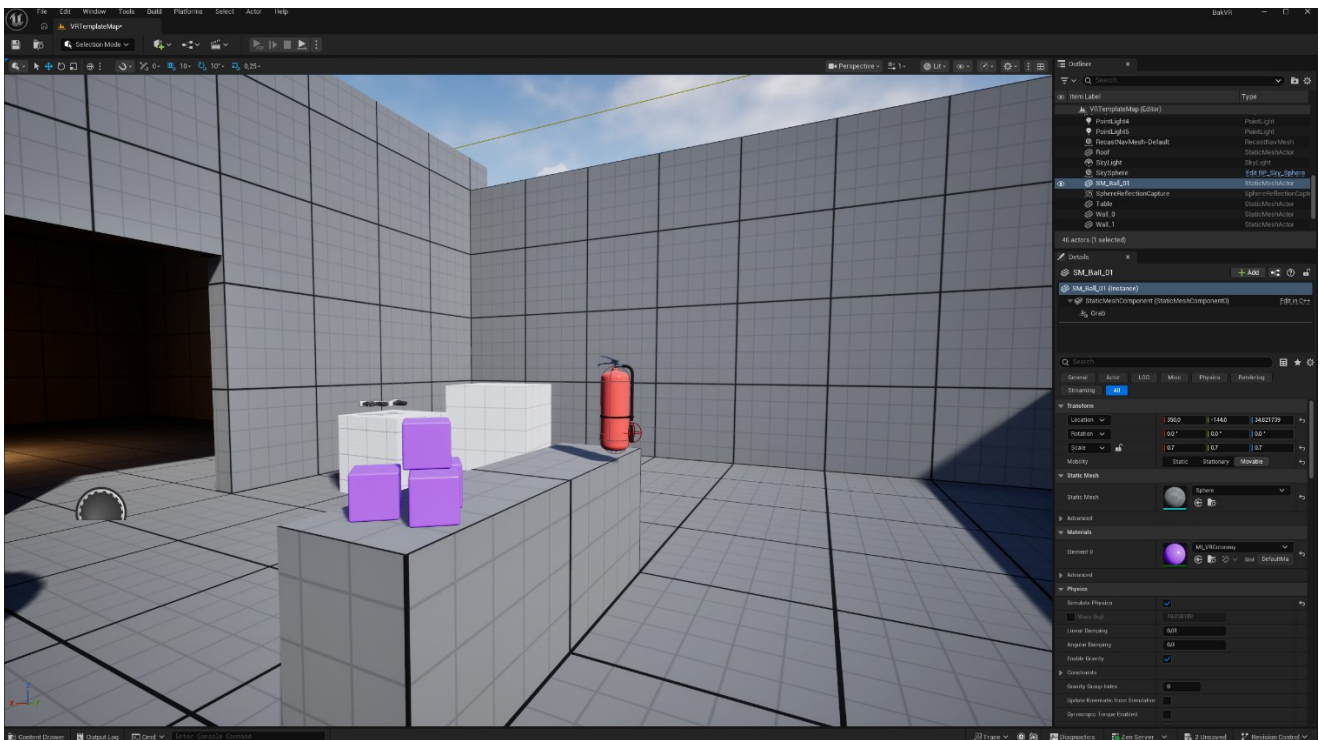
Třetí a technologicky nejnáročnější úroveň představují skupinové, či kooperativní simulace. Zatímco předchozí dvě kategorie jsou koncipovány jako zážitek pro jednoho uživatele, skupinové simulace propojují více osob ve stejném virtuálním prostoru v reálném čase. V těchto scénářích není primárním cílem pouze zvládnutí technického úkonu, ale především trénink měkkých dovedností, krizové komunikace a týmové spolupráce. Typickým využitím je koordinovaná evakuace velkého počtu osob, zásah hasičského sboru nebo nácvik třídění zraněných pacientů při hromadných mimořádných událostí. Z technického hlediska vyžaduje tato úroveň schopnou síťovou architekturu pro synchronizaci dat mezi všemi brýlemi bez znatelného zpoždění a složitou optimalizaci vykreslování vícero avatarů současně, což může přesahat limity běžných Standalone zařízení a vyžadovat připojení k výkonnějším počítačům.

3.6 Softwarové nástroje pro tvorbu virtuálního tréninkového simulátoru

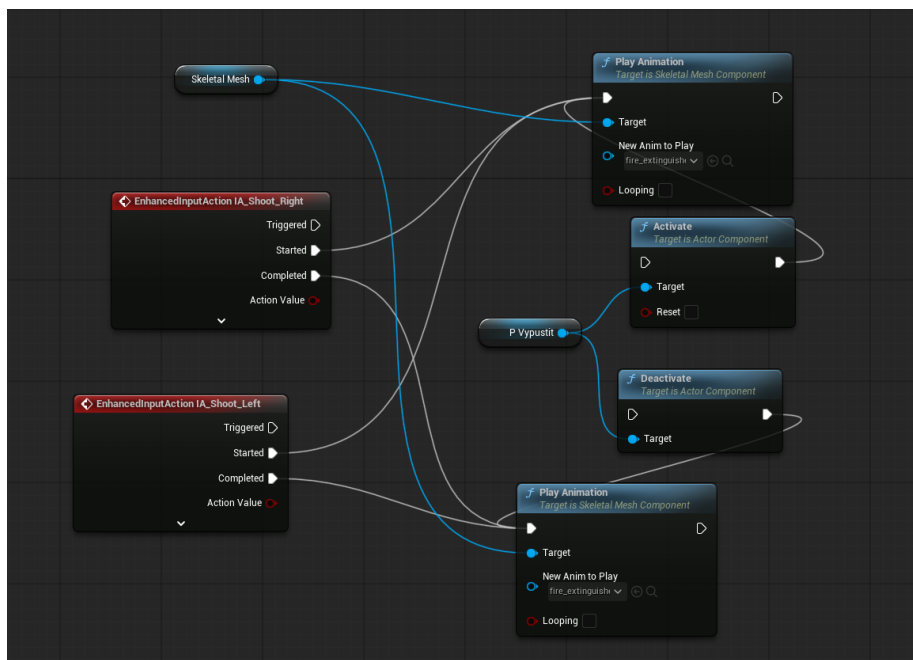
Pro realizaci interaktivní simulace ovšem není dostačující pouze výběr hardwaru, neboť volba softwarového ekosystému je kritická pro efektivitu vývoje, stabilitu a následnou udržitelnost aplikace. V současné době se nejčastěji již pro simulace nevyvíjejí vlastní enginey od základů, ale využívají se ověřené komerční řešení, která poskytují hotové nástroje pro fyziku, rendering a interakci.

3.6.1 Vývojové prostředí

Pro vývoj aplikace na platformě Standalone VR byl jako primární nástroj zvolen Unreal Engine. Tento nástroj je v dnešní době standardem pro vývoj mobilních XR aplikací, především díky své schopnosti efektivní optimalizace pro mobilní čipy s architekturou ARM. Významným faktorem pro tuto volbu je rovněž možnost vývoje bez nutnosti standardního programování, jelikož lze v tomto enginu vytvářet přes vizuální skriptování [16]



Obr. 21: Vývojové prostředí Unreal Engine



Obr. 22: Vizuální skriptování

3.6.2 Hand Tracking

Integrace hand trackingu by byla provedena pomocí standardu OpenXR, který zajišťuje kompatibilitu napříč různými VR zařízeními (např. Meta Quest). Základem systému je sledování 26 klíčových bodů (tzv. joints) na každé ruce uživatele. Z těchto dat je v Unreal Enginu dynamicky generován kinematický model (Skeletal Mesh) reprezentující virtuální ruce. Pro účely praktického vytvoření práce a snadnější testování ovšem bylo nakonec použito ovládání pomocí ovladačů, jak již ale bylo zmíněno a ještě v další podkapitole bude při reálné aplikaci této simulace pro trénink by byl hand tracking ideálnější možností.

3.6.3 Implementace uživatelského rozhraní (UI)

Pro tvorbu rozhraní bylo použito Widgetů, kde jedná se o 3D objekty vznášející se ve virtuální scéně. V rámci aplikace byly využity pro pokyny uživateli, které zároveň reagují na změny stavu v simulaci např. při uhašení požáru uživateli oznámí další kroky nebo při použití špatného typu hasičského přístroje na to také upozorní.



Obr. 23: Ukázka widget textu

4 Návrh modelového tréninkového scénáře

Tato kapitola detailně popisuje postup tvorby modelového tréninkového scénáře a jeho implementace do simulace v Unreal Engineu.

4.1 3D modely a materiály

Vizuální stránka virtuálního prostředí hraje klíčovou roli v celkové imerzi uživatele do simulace. Při volbě a implementaci 3D modelů pro tuto práci bylo nutné najít rovnováhu mezi vizuální kvalitou a výpočetní náročností, která je v prostředí virtuální reality obzvláště kritická pro udržení stabilní snímkové frekvence. Z hlediska logiky engineu jsou modely v projektu rozděleny do dvou hlavních kategorií. První tvoří statické objekty prostředí (zdi, podlahy, rámy dveří), které dokreslují atmosféru a slouží pouze jako překážky v prostoru. Druhou, podstatně složitější kategorií, jsou objekty interaktivní. Tyto polygonové sítě (meshes) musely být v engineu podrobeny dalším úpravám, aby správně reagovaly na fyzikální systém či manipulaci pomocí VR ovladačů. Mezi stěžejní interaktivní prvky patří modely hasicích přístrojů, model únikových dveří, model počítače a model žaluzií.

4.1.1 Hasící přístroje

Základem pro interakci byl importovaný 3D model hasícího přístroje opatřený kostrou (Skeletal Mesh), která umožňuje nezávislý pohyb hadice. Po importu do prostředí Unreal Engine bylo nutné zajistit správné škálování modelu, aby odpovídal reálným proporcím v prostředí virtuální reality. Na model byly aplikovány PBR (Physically Based Rendering) materiály a na ústí hadice byl definován tzv. Socket (připojovací bod), který následně slouží jako zdroj pro emisi částic. Tento model byl následně upraven, kde na jeho plochu byla přidána fotografie nálepky reálného hasícího přístroje a následně byl tento model duplikován, kde byla změněna nálepka pro druhý typ hasícího přístroje a také jeho hadice, aby více odpovídala novému typu.

Základní uchopitelnost objektu v trojrozměrném prostoru je zajišťována specializovanou komponentou BP_GrabComponent. Při detekci úspěšného uchopení uživatelem (událost On Grabbed) je automaticky povolen vstup z ovladačů (uzel Enable Input), čímž je přístroj připraven přijímat další příkazy. Aby byla dodržena věrnost s reálnou předlohou, je před samotnou střelbou vyžadováno odjištění hasícího přístroje. Tento mechanismus je programově řešen prostřednictvím detekce překryvu (událost On Component Begin Overlap) v oblasti kolizního boxu pojistky (hitbox_pojistky). Při kontaktu s virtuální rukou je komponenta pojistky odstraněna (uzel Destroy Component), je spuštěna odpovídající animace a stavová proměnná Pojistkavytrzena je trvale nastavena na hodnotu True. Zcela analogickým způsobem je řešeno uchopení hadice (uchop_hadice), kdy je získávaná prostorová transformace ruky kontinuálně předávána do animačního blueprintu (abp_hasicak) pro korektní zobrazení úchopu hráče. Samotný proces hašení je inicializován prostřednictvím systému

rozšířených vstupů (Enhanced Input Action). Je-li detekováno stisknutí spouště (Triggered) a stavová proměnná potvrzuje, že je přístroj odjištěn, je okamžitě aktivován částicový systém reprezentující proud hasiva (komponenta P_Vypustit) a pomocná proměnná StrikaPenu je uvedena do aktivního stavu. Po uvolnění spouště (událost Completed) je vypuštění částic deaktivováno.

Základem hasební mechaniky je systém detekce zasažených objektů, který je prováděn pomocí metody vržení neviditelného paprsku (Line Trace By Channel). Je-li stisknuta spoušť, je v každém výpočetním snímku (Event Tick) generován paprsek vycházející ze směrového vektoru trysky. Pokud dojde k protnutí tohoto paprsku s kolizním modelem jiného objektu (Hit Actor), je cíl podroben identifikaci pomocí přetypování (uzel Cast). Při úspěšné detekci specifických entit, jakými jsou například hořící počítač (BP_HoriciPocitac) nebo hořící závěs (BP_HoriciZaves), je na tyto objekty odeslán exekuční příkaz k postupnému snížení zdraví ohně a jeho finálnímu uhašení (funkce Uhasit Ohen).

Bylo také nutné, aby uživateli byli přístupné informace měnící se podle situace, ve které se právě nachází, a tak byl přidán systém vizuálního varování, který je v herní scéně realizován prostřednictvím interaktivních 3D textových panelů. Komunikace mezi samotným hasicím přístrojem a konkrétní informační cedulí je navázána pomocí uchovávané objektové reference (proměnná CedulaHaseni). Při spuštění hasební procedury je z tohoto herního objektu nejprve extrahována komponenta uživatelského rozhraní (uzel Get Component by Class nastavený na Widget Component) a z ní je následně získán samotný grafický objekt (uzel Get User Widget Object). Aby mohly být modifikovány konkrétní parametry, je tento objekt explicitně přetypován (Casting) na specifickou třídu uživatelského rozhraní W_Instrukcehaseni2. Tímto procesem je do řídicího skriptu zpřístupněna přímá modifikace jednotlivých textových proměnných (např. Text Varovani Prasek nebo Text Varovani CO2). Je-li enginem vyhodnoceno nesprávné použití hasiva na daný typ požáru, je u příslušného textového bloku dynamicky aktivována viditelnost (funkce Set Visibility s parametrem Visible), čímž je uživateli zobrazeno varování. Vzhledem k tomu, že je střelba hasiva vyhodnocována v kontinuální výpočetní smyčce (Event Tick), je plynulost zobrazení striktně ošetřena logickou bránou Do Once. Tímto uzlem je efektivně zamezeno nežádoucímu cyklickému překreslování a blikání textu. Po úspěšném zobrazení varování je běh tohoto specifického vlákna pozastaven časovačem (Delay) na dobu přesně tří sekund. Jakmile je tento interval ukončen, je viditelnost textového varování opětovně skryta (parametr Hidden) a stavová brána je pomocí zpětné vazby resetována do výchozího stavu. Tímto uceleným mechanismem je systém plně automatizován a připraven na jakoukoliv další chybnou interakci ze strany uživatele.



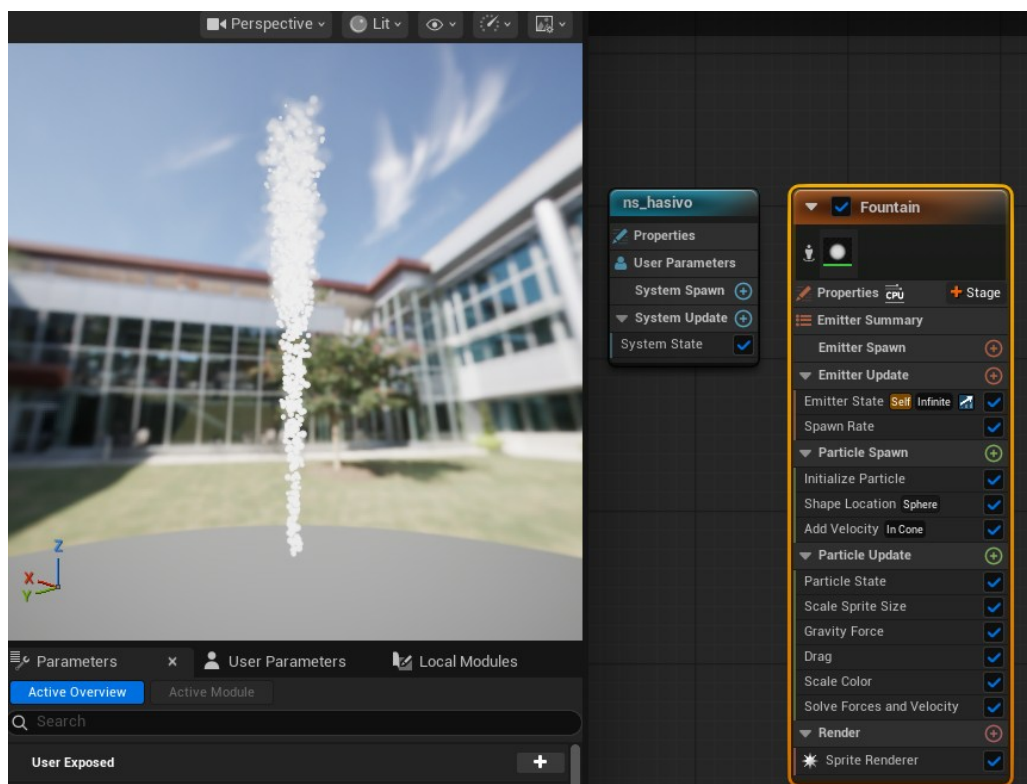
Obr. 24: Model práškového hasícího přístroje



Obr. 25: Model CO2 hasičiho přístroje

4.1.2 Částicový systém pro simulaci hasiva

Pro vizualizaci stříkajícího prášku byl využit systém Niagara. Cílem bylo vytvořit efekt, který je vizuálně přesvědčivý, ale zároveň výpočetně nenáročný, aby nedocházelo k poklesu snímkové frekvence ve VR headsetu. Byl vytvořen vlastní optimalizovaný materiál (M_Kour) využívající metodu Translucent Grey Transmittance. Tento materiál nevyužívá složité výpočty nasvícení (režim Unlit). Místo toho generuje měkký sférický přechod pomocí funkce Radial Gradient Exponential, který je následně násoben hodnotou průhlednosti (Alpha) z enginu.



Obr. 26: Vizualizace nastavení hasiva

4.1.3 Modely interaktivního počítače a žaluzie

Po úspěšném odeslání exekučního příkazu z hasičího přístroje je aktivována vnitřní logika samotného zasaženého objektu, v tomto případě hořící počítač (BP_HoriciPocitac) ale obdobné fungování je i u hořícího závěsu (BP_HoriciZaves). Jakmile je vyvolána událost UhasitOhen, je spuštěn proces postupné redukce plamenů. Řídícím parametrem tohoto stavu je proměnná ZdraviOhne. Její hodnota je při každém obdržení události snížena o konstantní hodnotu 0,004. Pro zachování platných číselných hodnot je výsledek vždy omezen funkcí Clamp do intervalu $\langle 0,0; 1,0 \rangle$. Z této aktualizované hodnoty je následně odvozeno aktuální prostorové měřítko (funkce Set Relative Scale 3D) pro částicový systém ohně (komponenta Niagara). Snižování hodnoty zdraví ohně se tak v herním světě projevuje plynulým

vizuálním zmenšováním objemu plamenů. Jakmile je navazující podmínkou zjištěno, že hodnota ZdraviOhne dosáhla nuly nebo klesla pod ni, je částicový emitör deaktivován (funkce Deactivate). Tím je požár na daném objektu trvale zlikvidován.

Vedle samotného procesu hašení je do simulace zahrnuta také mechanika tepelné degradace zasaženého předmětu, čímž je dosaženo vyšší míry autenticity. Tato logika je průběžně vyhodnocována ve výpočetní smyčce Event Tick. Nejprve je podmínkou ověřeno, zda oheň stále aktivně hoří (tedy zda je proměnná ZdraviOhne větší než nula). Pokud je tato podmínka splněna, je vypočítáváno narůstající poškození materiálu. Stavová proměnná HodnotaSpaleni je v každém snímku zvyšována na základě uběhlého času (Delta Seconds vynásobeného koeficientem 0,05) a opět omezena do intervalu $\langle 0,0; 1,0 \rangle$. Vypočtená úroveň poškození je průběžně předávána do materiálů 3D modelu počítače (ModelPC) jako dynamický skalární parametr s názvem UrovenSpaleni (funkce Set Scalar Parameter Value on Materials). Tímto postupem je zajištěno, že dokud není požár zcela uhašen, povrch zasaženého objektu vizuálně černá a jeho textura plynule přechází do ohořelého stavu v závislosti na délce působení plamenů.



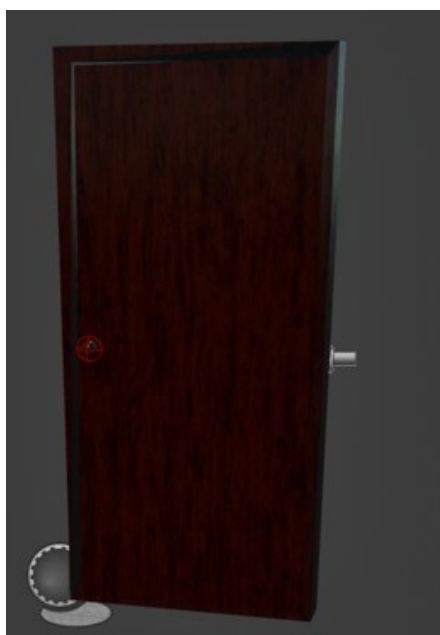
Obr. 27: Zapálený model počítače

4.1.4 Únikové dveře

Úvodem je nutné podotknout, že implementovaný model únikových dveří (BP_UnikoveDvere) neslouží jako exaktní simulace certifikovaných únikových východů, které v reálném světě podléhají přísným stavebním a bezpečnostním normám. Z důvodu plynulosti a ovladatelnosti virtuálního zážitku nejsou v modelu zohledněny specifické technické požadavky, jako je přítomnost panikového kování, protipožární odolnost křídla nebo systémy automatického odblokování. Pro účely této edukační aplikace byl model navržen

primárně s ohledem na demonstraci základní a intuitivní manuální interakce hráče v prostoru. Pro manipulaci s těmito dveřmi ve virtuálním prostředí tedy není využíváno předpřipravených statických animací, ale je implementován systém založený na herní fyzikální simulaci. Samotný pohyb dveří je řízen prostřednictvím komponenty Physics Handle. Tento nástroj umožňuje dynamické tažení 3D objektů v prostoru s ohledem na definované fyzikální hranice, které jsou v tomto případě vymezeny komponentou virtuálního pantu (PhysicsConstraint).

Proces otevírání je zahájen událostí uchopení (On Grabbed), kterou detekuje modul BP_GrabComponent umístěný na klice. Při úspěšném úchopu je nejprve získána přesná prostorová souřadnice kliky (Hitbox Kliky). Tato pozice je následně využita k fyzickému uchycení modelu dveří ovladačem Physics Handle (funkce Grab Component at Location). Zároveň je do stavové proměnné Nase Ruka uložena reference na ovladač hráče, čímž je systému jednoznačně definován zdroj pohybu. Vlastní pohyb dveří je zpracováván v pravidelné výpočetní smyčce Event Tick. V každém vykresleném snímku je nejprve ověřena platnost reference ruky funkcí Is Valid, čímž je zjištěno, zda hráč kliku stále aktivně drží. Pokud je výsledek kladný, je kontinuálně načítána aktuální poloha ruky v herním světě. Tato souřadnice je plynule předávána do fyzikálního ovladače jako nová cílová lokace (funkce Set Target Location). Dveře díky tomu fyzicky následují pohyb hráčovy ruky, přičemž jejich dráha a úhel otevření jsou přirozeně omezeny nastavením pantu ukotveného v rámu. Ukončení manipulace nastává při vyvolání události upuštění (On Dropped). V tomto okamžiku je model dveří z fyzikálního ovladače uvolněn (funkce Release Component) a proměnná s referencí na ruku je vymazána. Výpočetní smyčka pro pohyb je tímto krokem přerušena a dveře jsou ponechány v aktuální poloze, kde dále podléhají pouze standardní herní fyzice a případným dalším interakcím s okolím.



Obr. 28: Model únikových dveří

4.2 Zdroje 3D modelů

Modely byly přidány z komunitního trhu Unreal Engine Fab a Sketchfab a byly před implementací zhodnoceny z hlediska topologie (počtu polygonů) a rozlišení textur. Níže jsou v tabulkách vypsány použité 3D modely v jejich základním stavu.

Tab. 3: Zdroje z Unreal Engine Fab

Unreal Engine Fab			
Název	Id	Typ	Specifikace
Perfect Fire VFX	NS_Fire_Small	Efekt	Oheň pro počítač
Perfect Fire VFX	NS_Fire_Medimu	Efekt	Oheň pro závěs
Modular Housing Basic	M_Floor3x3m	Statický objekt	Podlahy
Modular Housing Basic	M_Door_Basic	Statický objekt	Dveře
Modular Housing Basic	M_Doorframe_standart	Statický objekt	Rám dveří
Hanging light	scene	Statický objekt	Světla
Computer Classroom	COMPUTERdemoscene	Statický objekt	Hlavní část místnosti
Computer Classroom	COMPUTERdemoscene_24	Statický objekt	Stůl
Computer Classroom	COMPUTERdemoscene_9	Statický objekt	Počítač
Computer Classroom	COMPUTERdemoscene_1	Statický objekt	Závěs

(zdroj: <https://www.fab.com/>)

Tab. 4: Zdroje z Sketchfab

Sketchfab			
Název	Id	Typ	Specifikace
Simple fire extinguisher for game	fire_extinguisher	Statický objekt	Model pro hasičák
Simple fire extinguisher for game	fire_extinguisher_Skeleton	Kostra	Kostra pro hasičák
Simple fire extinguisher for game	fire_extinguisher-Spray_Play	Animace	Animace pro stisknutí spouště
Simple fire extinguisher for game	fire_extinguisher-Spray_Stop	Animace	Animace pro puštění spouště
Simple fire extinguisher for game	fire_extinguisherI-dle_pull_out_the_key	Animace	Animace pro vytažení pojistky
Exit Box	Cube	Statický objekt	Značka pro směr únikového východu
Emergency exit	emergency_exit1	Statický objekt	Označení únikového východu

(zdroj: <https://sketchfab.com/>)

5 Souhrn doporučení pro nasazení virtuálních tréninkových simulátorů v bezpečnostní praxi

Vyvinutá interaktivní simulace představuje moderní technologický nástroj, avšak pro jeho maximální efektivitu je nezbytné, aby nebyl vnímán pouze jako izolovaná technologická ukázka. Je vyžadováno jeho systematické začlenění do dlouhodobých vzdělávacích plánů podniku. Na základě provedené analýzy technologií a poznatků z návrhu samotného tréninkového scénáře je předkládán soubor strategických, logistických a metodických doporučení, kterými by se měly organizace při zavádění virtuální reality do bezpečnostní přípravy řídit.

Primárním doporučením je koncepční integrace virtuální reality do stávajícího systému školení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci (BOZP) a požární ochrany. Zavedení VR simulace by nemělo zcela nahradit klasické teoretické vzdělávání, nýbrž by mělo sloužit jako jeho praktická nadstavba. Je doporučováno aplikovat fázovaný model výuky, kdy jsou zaměstnanci nejprve seznámeni s teoretickými požárními směrnici a evakuačními plány prostřednictvím tradičních metod či e-learningu. Následně je teoretická znalost ověřena právě prostřednictvím navrženého VR scénáře, ve kterém je účastník vystaven stresovým faktorům akutního stádia krize. Tímto přístupem je zajištěno, že princip učení se prožitkem (learning-by-doing) padá na připravený teoretický základ, čímž je maximalizována efektivita fixace správných rozhodovacích návyků, jako je například volba správného hasiva pro elektroniku.

Z hlediska logistického zajištění a distribuce hardwaru je silně doporučováno využití výhradně takzvaných Standalone VR systémů, jakým je například Meta Quest. Vzhledem k plné absenci kabeláže a externích sledovacích stanic není pro realizaci tréninku vyžadována dedikovaná technologická laboratoř. Školení tak může být prováděno přímo v běžných zasedacích místnostech podniku, což rapidně snižuje provozní náklady a časovou náročnost na organizaci tréninku. Při hromadném nasazení zařízení je ovšem zcela kritické dbát na dodržování vysokých hygienických standardů. Je doporučováno vybavit headsety vyměnitelnými silikonovými nebo jednorázovými obličejovými maskami a využívat k jejich ošetření dezinfekční prostředky či certifikované UV čističky. V tomto ohledu se jako velmi efektivní jeví navrhované využití technologie sledování rukou (Hand Tracking), neboť tím zcela odpadá nutnost fyzické manipulace a následné dezinfekce klasických ovladačů mezi jednotlivými účastníky školení.

Zásadní pozornost musí být při praktickém nasazení věnována také metodickému vedení samotného nácviku. Ačkoliv byla simulace navržena s ohledem na minimalizaci rizika vzniku kinetózy prostřednictvím implementace lokomoční metody teleportace, je stále vyžadována fyzická přítomnost proškoleného instruktora. Během průběhu scénáře je nezbytné monitorovat fyziologický i psychický stav účastníka, neboť vysoká míra imerze a prezence může u citlivějších jedinců vyvolat reálnou stresovou odezvu spojenou s dezorientací. Stejně důležitá jako samotná simulace je pak fáze takzvaného debriefingu, která musí

bezprostředně následovat po ukončení scénáře. Během tohoto strukturovaného rozhovoru jsou instruktorem analyzovány provedené kroky, jsou vysvětleny případné chyby, jakými může být namíření práškového hasicího přístroje na hořící počítač, a je poskytnuta konstruktivní zpětná vazba. Poslední soubor doporučení se týká dlouhodobé udržitelnosti a analytického potenciálu vytvořené simulace. Virtuální realita poskytuje bezpečnostním manažerům bezprecedentní možnost přesného sběru dat o chování personálu během simulované krizové situace. Je doporučováno začlenit do aplikace mechanismy pro měření reakčních časů, sledování trajektorií pohybu či evidenci četnosti chybných rozhodnutí. Tato anonymizovaná data mohou následně sloužit jako vysoce cenný podklad pro optimalizaci reálných požárních směrnic a havarijních plánů podniku. Dále je nutné zdůraznit, že pokud je virtuální prostředí postaveno na principu digitálního dvojčete reálného pracoviště, je absolutně nezbytné zajistit jeho průběžnou aktualizaci. Pokud dojde v reálném objektu k přestavbě, změně únikových tras nebo k přemístění hasebních prostředků, musí být tyto modifikace obratem reflektovány i ve VR scénáři. V opačném případě by mohlo dojít k zafixování nesprávných prostorových návyků, což by v případě reálného akutního stádia krize mohlo vést k fatálním následkům.

Závěr

Tato bakalářská práce se komplexně zabývala problematikou implementace technologií virtuální reality do systémů přípravy na mimořádné události, a to ve specifickém kontextu objektové bezpečnosti a facility managementu. Hlavním cílem práce bylo nejen teoreticky analyzovat potenciál těchto moderních technologií, ale především navrhnout a popsat efektivní tréninkový nástroj ve formě interaktivního virtuálního scénáře, který by byl aplikovatelný v podnikové praxi. Na základě provedených analýz a vytvořeného technického návrhu lze konstatovat, že stanovené cíle se podařilo v plném rozsahu naplnit. V rámci teoretické a analytické části bylo zjištěno, že tradiční formy bezpečnostních školení často selhávají v přípravě personálu na psychologický tlak, který provází akutní stádium krize. Virtuální realita naproti tomu nabízí vysoce imerzní prostředí, ve kterém je možné bezpečně aplikovat princip učení se prožitkem (learning-by-doing). Na základě provedené hardwarové a softwarové komparace byla jako nejvhodnější řešení pro firemní nasazení identifikována architektura Standalone VR. Ta díky své mobilitě, absenci omezující kabeláže a pokročilým metodám interakce, jakým je například přímé sledování rukou, odstraňuje dřívější logistické překážky a umožňuje rychlou realizaci školení v běžných prostorách podniku.

Stěžejním výstupem práce se stal detailní návrh modelového tréninkového scénáře, který simuluje řešení počínajícího požáru v administrativním prostředí. Popisovaná technická implementace v prostředí Unreal Engine potvrdila, že lze vytvořit sofistikovanou a interaktivní simulaci i při zohlednění výkonnostních limitů mobilních VR zařízení. Jádro scénáře bylo navrženo tak, aby uživatele nutilo k aktivnímu kognitivnímu rozhodování – od identifikace typu zasaženého objektu, přes kritickou volbu vhodného hasebního prostředku s ohledem na minimalizaci sekundárních škod, až po samotnou fyzickou manipulaci a následnou správnou evakuaci. Paralelně byly úspěšně ošetřeny limity lidské fyziologie využitím teleportace, čímž bylo minimalizováno riziko vzniku kinetózy u uživatelů. Aby technické řešení nepředstavovalo pouze izolovaný softwarový prototyp, byl v závěru práce formulován ucelený soubor doporučení pro jeho metodické a strategické začlenění do existujících procesů krizového managementu. Z tohoto souhrnu jasně vyplynulo, že maximální efektivita simulace lze dosáhnout pouze jejím spojením s teoretickou přípravou, odborně vedeným debriefingem a následnou hloubkovou analýzou uživatelských dat, která mohou zpětně posloužit k optimalizaci reálných havarijních plánů. Navržený scénář nebyl validován uživatelskou studií – toto ověření přesahuje rozsah bakalářské práce a je identifikováno jako oblast pro navazující výzkum. Dále nebylo provedeno srovnávací testování efektivity VR tréninku oproti tradičním metodám školení v podmínkách konkrétní organizace.

Závěrem lze shrnout, že virtuální realita již v kontextu objektové bezpečnosti nepředstavuje experimentální koncept, ale stává se reálně dostupným a vysoce efektivním nástrojem moderního bezpečnostního managementu. Implementace navržených postupů do praxe má prokazatelný potenciál zkrátit a zpřesnit lidskou reakci v kritických minutách mimořádné

události, čímž organizacím poskytuje zásadní výhodu při ochraně majetku, zdraví, a především lidských životů. [3]

Seznam použité literatury

- [1] BURDEA, Grigore C. a Philippe COIFFET. Virtual Reality Technology. 3rd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2024. ISBN 978-1-118-01480-6.
- [2] ALDRICH, Clark. The Complete Guide to Simulations and Serious Games: How the Most Valuable Content Will be Created in the Age Beyond Gutenberg to Google. San Francisco: Pfeiffer, 2009. ISBN 978-0-470-46273-7.
- [3] HUNG, Ming-Chuan, Ching-Yuan LIN a Gary Li-Kai HSIAO. "Virtual Reality in Building Evacuation: A Review." Fire. 2024, roč. 8, č. 2, s. 80. ISSN 2571-6255. DOI: 10.3390/fire8020080.
- [4] ANTUŠÁK, Emil a Josef VILÁŠEK. Základy teorie krizového managementu. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3443-2.
- [5] KOTEK, Lukáš. Prezentace pro bezpečnostní inženýrství. Online. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2024. Studijní materiál pro předmět Bezpečnostní inženýrství. Dostupné z: <https://moodle.utb.cz/course/view.php?id=31199> [cit. 2026-03-19].
- [6] KOTEK, Lukáš. Prezentace pro krizový management. Online. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2024. Studijní materiál pro předmět Krizové plánování a řízení. Dostupné z: <https://moodle.utb.cz/course/view.php?id=32582> [cit. 2026-03-19].
- [7] Hasičský záchranný sbor České republiky. Online. Hasičský záchranný sbor České republiky. Dostupné z: <https://hzscr.gov.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx>. [cit. 2026-05-20].
- [8] TEAM, Interactive. What Are the Different Types of Fire Extinguishers? Online. National Fire Supply. Dostupné z: <https://nationalfiresupply.com/types-of-fire-extinguishers/>. [cit. 2026-05-20].
- [9] CONTRIBUTORS, Wikipedia. 3D computer graphics. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_computer_graphics. [cit. 2026-05-20].
- [10] PRODUCTIONS, Mimic. 3D Scanning Technologies - What is 3D Scanning and How Does it Work? Online. Mimic Productions. Dostupné z: <https://www.mimicproductions.com/post/3d-scanning-technologies>. [cit. 2026-05-20].
- [11] CONTRIBUTORS, Wikipedia. Virtual Boy. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_Boy. [cit. 2026-05-20].
- [12] CONTRIBUTORS, Wikipedia. Oculus Quest. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Oculus_Quest. [cit. 2026-05-20].
- [13] Best VR Full Body Tracking [Guide]: Pros & Cons of Trackers. Online. Dostupné z: <https://blog.vive.com/us/vr-full-body-tracking-guide-pros-and-cons-of-tracker-technologies/>. [cit. 2026-01-12].
- [14] Quest 3 Brings a Big Change to Controller Tracking Coverage. Online. Dostupné z: <https://www.roadtovr.com/quest-3-touch-plus-tracking-coverage/>. [cit. 2026-01-12].
- [15] Meta Quest 3 update brings important new hand tracking features. Online. Dostupné z: https://www.phonearena.com/news/meta-quest-3-update-hand-tracking-improvements_id155461. [cit. 2026-01-12].

- [16] Step-by-Step Hand Tracking UI and Ray Interactions Tutorial [QUEST META SDK]. Online. YouTube. 2025. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=K1Hzeho75iA>. [cit. 2026-01-12].
- [17] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Fotogrammetrie*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie>. [cit. 2026-05-20].
- [18] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Lidar*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lidar>. [cit. 2026-05-20].
- [19] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *Retopology*. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Retopology>. [cit. 2026-05-20].

- [20] JERALD, Jason. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. New York: Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, 2016. ISBN 978-1-97000-112-9.
- [21] SHUANGKANG FANG, I-Chao Shen. Computer Science > Computer Vision and Pattern Recognition. Online. ArXiv.org. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2507.23374v1>. [cit. 2026-05-20].
- [22] XGRIDS. Online. XGRIDS. Dostupné z: <https://www.xgrids.com/>. [cit. 2026-05-20].

Příloha A: Manuál pro tréninkový simulátor

Příloha B: Projekt v Unreal Engine