

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270012 - Průmyslové inženýrství a management

**Studijní specializace:** Bez specializace

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Virtual Reality Sickness**

**Autor:** Bc. Ondřej HOLUB

**Vedoucí práce:** Mgr. Ing. Alena Lochmannová, Ph.D. et Ph.D., MBA

**Konzultant:** Ing. Matěj Dvořák

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2023/2024

Studijní program: Průmyslové inženýrství a management  
Forma studia: Prezenční

## Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej HOLUB**  
Osobní číslo: **S22N0011P**  
Adresa: **Kraslická 219, Lomnice, 35601 Sokolov 1, Česká republika**  
Téma práce: **Virtual Reality (VR) Sickness**  
Téma práce anglicky: **Virtual Reality (VR) Sickness**  
Jazyk práce: **Čeština**  
Vedoucí práce: **Mgr. Ing. Alena Lochmannová, Ph.D. et Ph.D., MBA**  
**Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

### Zásady pro vypracování:

1. Rozbor světa a problematiky VR
2. Charakteristika VR sickness
3. Analýza současného stavu a dosavadních zjištění
4. Realizace měření ve VR
5. Návrhy na zlepšení
6. Zhodnocení a Závěr

### Seznam doporučené literatury:

- BOROŠ, Martin, Eva SVENTEKOVÁ, Anna CIDLINOVA, Marek BARDY a Katerina BATRLOVA, 2022. Application of VR Technology to the Training of Paramedics. *Applied Sciences* [online]. 12, 1172. Dostupné z: doi:10.3390/app12031172
- BUHLER, Helmut, Sebastian MISZTAL a Jonas SCHILD, 2018. Reducing VR Sickness Through Peripheral Visual Effects. In: *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* [online]. s. 517–9. Dostupné z: doi:10.1109/VR.2018.8446346
- HOWARD, Matt a Elise ZANDT, 2021. A meta-analysis of the virtual reality problem: Unequal effects of virtual reality sickness across individual differences. *Virtual Reality* [online]. 25. Dostupné z: doi:10.1007/s10055-021-00524-3
- CHANG, Eunhee, Hyun-Taek KIM a Byoungyun YOO, 2020. Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction* [online]. 36, 1–25. Dostupné z: doi:10.1080/10447318.2020.1778351
- KIM, Yoon Sang, JuHye WON, Seong-Wook JANG a Junho KO, 2022. Effects of Cybersickness Caused by Head-Mounted Display-Based Virtual Reality on Physiological Responses: Cross-sectional Study. *JMIR serious games* [online]. 10(4), e37938. ISSN 2291-9279. Dostupné z: doi:10.2196/37938
- KOURTESIS, Panagiotis, Rayaam AMIR, Josie LINNELL, Ferran ARGELAGUET a Sarah E. MACPHERSON, 2023. Cybersickness, Cognition, & Motor Skills: The Effects of Music, Gender, and Gaming Experience. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* [online]. 29(5), 2326–2336. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2023.3247062
- LOCHMANNOVÁ, Alena, Šimon MICHAL, Petr HOREJSI, Marek BARDY, Stanislava REICHERTOVÁ a Klára GILLERNOVÁ, 2022. The Use of Virtual Reality in Training Paramedics for a Mass Casualty Incident. *Applied Sciences* [online]. 12, 11740. Dostupné z: doi:10.3390/app122211740
- MARTIROSOV, Sergo, Petr HOŘEJŠÍ, Pavel KOPEČEK, Marek BUREŠ a Michal ŠIMON, 2021. The Effect of Training in Virtual Reality on the Precision of Hand Movements. *Applied Sciences* [online]. 11(17). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11178064
- MAZLOUMI GAVGANI, Alireza, Frederick WALKER, Deborah HODGSON a Eugene NALIVAİKO, 2018. A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and "classic" motion sickness: Are they different? *Journal of Applied Physiology* [online]. 125. Dostupné z: doi:10.1152/jappphysiol.00338.2018
- MELO, Miguel, José VASCONCELOS-RAPOSO a Maximino BESSA, 2017. Presence and cybersickness in immersive content: Effects of content type, exposure time and gender. *Computers & Graphics* [online]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cag.2017.11.007

PORCINO, Thiago, Daniela TREVISAN a Esteban CLUA, 2020. Minimizing cybersickness in head-mounted display systems: causes and strategies review. In: *2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* [online]. s. 154–163. Dostupné z: doi:10.1109/SVR51698.2020.00035

SEVINC, Volkan a Mehmet BERKMAN, 2019. Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments. *Applied ergonomics* [online]. 82, 102958. Dostupné z: doi:10.1016/j.apergo.2019.102958

ZHANG, Jingjing, Mengjie HUANG, Rui YANG, Yiqi WANG, Xiaohang TANG, Ji HAN a Hai-Ning LIANG, 2023. Understanding the effects of hand design on embodiment in virtual reality. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* [online]. 37. Dostupné z: doi:10.1017/S0890060423000045

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum:

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí této diplomové práce Mgr. Ing. Aleně Lochmannové, Ph.D. et Ph.D., MBA. Její moudré rady, odborné zkušenosti, soucit, trpělivost, klidný a vstřícný přístup při vedení diplomové práce byli nedocenitelné a jsem velice poctěn za příležitost psát tuto práci pod jejím vedením. Mnohé díky patří i konzultantovi Ing. Matěji Dvořákovi, bez jehož obětavosti, soucitu, a ochoty rychle pomoci v nouzi, by tato diplomová práce ani zdaleka nebyla schopna dosáhnout svých kvalit a stihnout býti hotova včas. Také bych rád poděkoval Ing. Marku Burešovi, Ph.D. za zařízení a poskytnutí měřicí technologie a softwaru využité v rámci diplomové práce. Na závěr bych rád z celé své duše poděkoval rodině a kamarádům, za projevenou lásku, pomoc a útěchu v nejtemnějších momentech. Děkuji vám všem!

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Holub	<b>Jméno</b> Ondřej	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270012 - Průmyslové inženýrství a management		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Mgr. Ing. Lochmannová, Ph.D. et Ph.D., MBA	<b>Jméno</b> Alena	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KPV		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Virtual Reality Sickness		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KPV	<b>ROK ODEVZD.</b>	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	91	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	84	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce se zaměřuje na tematiku VR sickness u současných VR systémů. Práce zkoumá současné chápání, studie a spojitosti tohoto jevu s podobnými úkazy jako kinetóza, a současné strategie pro jeho mitigaci. V rámci diplomové práce je realizováno měření skupiny subjektů ve VR, které sleduje vliv VR sickness na jasnost instrukcí, výkon, a jiné dopady na člověka. Výsledky měření, jsou porovnány s předchozími studii, zdali se shodují nebo nikoliv. Cílem je využít zjištění z předešlých studií a data získaná z měření pro shrnutí dosavadního chápání VR sickness, a sestavení možných řešení tohoto úkazu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	HMD, VR, Virtuální realita, VR sickness, Cybersickness, Kinetóza, Měření, Simulace, Unity, GSR, NASA TLX, SSQ

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Holub	<b>Name</b> Ondřej
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270012 – Industrial engineering and management	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Mgr. Ing. Lochmannová, Ph.D. et Ph.D., MBA	<b>Name</b> Alena
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KPV	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Virtual Reality Sickness	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KPV	<b>SUBMITTED IN</b>	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	91	<b>TEXT PART</b>	84	<b>GRAPHICAL PART</b>	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Diploma thesis focuses on the topic of VR sickness in current VR systems. Thesis Investigates current understanding, studies, and connections of this occurrence with similiar phenomenas like motion sickness, and current strategies of its mitigation. A measuring of a group of subjects in VR is conducted within the scope of this diploma thesis, that observes influence of VR sickness on clarity of instructions, performance, and other impacts on human. Results of the measuring are compared to previous studies, if they match or not. The goal is to utilize findings of previous studies and gathered data from measuring to summarize current understanding of VR sickness and to construct possible solutions of this phenomena.
<b>KEY WORDS</b>	HMD, VR, Virtual reality, VR sickness, Cybersickness, Motion sickness, Measure, Simulation, Unity, GSR, NASA TLX, SSQ

## Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	11
Seznam grafů.....	11
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	12
Úvod.....	13
1 Rozbor světa a problematiky VR .....	15
1.1 Virtuální realita (VR).....	15
1.1.1 Taxonomie VR .....	16
1.1.2 CAVE VR .....	17
1.1.3 HMD - Head-mounted display .....	18
1.1.4 Využití a přínosy virtuální reality .....	27
1.1.5 Limity, problémy a úskalí .....	29
1.2 Augmentovaná realita (AR).....	31
1.3 Smíšená/Mixed realita (MR) .....	33
1.4 Simulátory .....	34
2 Charakteristika VR sickness.....	35
2.1 Sickness - taxonomie, definice, popis .....	35
2.2 Faktory ovlivňující VR sickness.....	38
2.2.1 Aktuální zdravotní stav a biologické predispozice .....	38
2.2.2 Užívaná VR technologie .....	39
2.2.3 Virtuální prostředí a navigace .....	41
2.2.4 Čas a zkušenost .....	42
3 Analýza současného stavu a dosavadních zjištění .....	43
3.1 Design VR systémů a technologie.....	43
3.2 Navigace a design ve VR prostředí .....	44
3.3 Současné metody měření a prevence VR sickness .....	45
3.3.1 Metody měření .....	45
3.3.2 Prevence a léčba .....	49
4 Měření VR sickness ve virtuální realitě .....	50
4.1 Vstupní dotazník.....	50
4.2 VR vybavení a senzory.....	51
4.3 Aplikace pro měření VR sickness .....	54
4.4 Postup a organizace měření .....	60
4.5 Výsledky měření.....	61



4.5.1	Subjekty a vstupní dotazník .....	61
4.5.2	NASA TLX .....	67
4.5.3	Simulator Sickness Questionnaire (SSQ).....	71
4.5.4	Analýza VR záznamu a hodnot GSR senzorů.....	75
4.5.5	Časová analýza měření.....	80
4.5.6	Vliv VR sickness na úspěšnost subjektů a jasnost instrukcí .....	83
4.5.7	Problémy a limitace měření.....	84
5	Navrhovaná řešení VR sickness .....	85
5.1	Adaptace na VR sickness .....	85
5.2	Ergonomie, provedení a funkce VR HMD .....	86
5.3	Standardy pro vývoj VR softwaru a design prostředí.....	89
5.4	Uzpůsobení skutečného prostředí a podmínek pro VR .....	90
5.5	Etika užívání VR .....	91
6	Zhodnocení a limitace .....	92
6.1	Shrnutí poznatků.....	92
6.2	Teoretická nejpřínosnější řešení .....	94
6.3	Limitace .....	95
	Závěr.....	96
	Seznam použitých zdrojů .....	97
	PŘÍLOHY .....	i
	Příloha č. 1 - Vstupní dotazník.....	i
	Příloha č. 2 - Simulation Sickness Questionnaire dotazník .....	iii
	Příloha č. 3 - NASA TLX dotazník .....	vi

## Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Vyobrazení místnosti pro VR systém typu CAVE [63].....	18
Obrázek 1-2: Vnitřní struktura VR HMD systému [64] .....	19
Obrázek 1-3: Design ovladačů doprovázejících VR HMD [65].....	19
Obrázek 1-4: VR HMD typu standalone [66] .....	20
Obrázek 1-5: VR HMD typu tethered [67] .....	20
Obrázek 1-6: Sestava VR systému s outside-in snímáním [68].....	21
Obrázek 1-7: VR HMD s inside-out snímáním [69].....	22
Obrázek 1-8: Monokulární a binokulární zorné pole člověka [70].....	24
Obrázek 1-9: Horizontální a vertikální zorné pole člověka [31].....	24
Obrázek 1-10: AR brýle zobrazující virtuální prvek [72].....	32
Obrázek 1-11: Vizualizace objektu ve smíšené realitě [73].....	33
Obrázek 1-12: Vnitřní pohled z kabiny leteckého simulátoru [74].....	34
Obrázek 4-1: VR HMD – Meta Quest 2 [87].....	51
Obrázek 4-2: Senzory TEA CAPTIV T-SENS GSR [79].....	52
Obrázek 4-3: Vzhled aplikace CAPTIV – Porovnání grafu $\mu$ S s VR záznamem.....	53
Obrázek 4-4: Pohled na halu modifikované verze VR montážní aplikace .....	54
Obrázek 4-5: Objekt uživatele usazen za nízkozdvíhací vozítko .....	55
Obrázek 4-6: Pohled uživatele při jízdě skrz halu.....	56
Obrázek 4-7: Časová osa animace nízkozdvíhacího vozíku .....	56
Obrázek 4-8: Pohled na montážní stanoviště .....	57
Obrázek 4-9: Pohled uživatele na montážním stanovišti .....	57
Obrázek 4-10: Přehled jednotlivých kroků montážního procesu .....	58
Obrázek 4-11: Subjekt stiskávající nápočetní tlačítko .....	59
Obrázek 4-12: Monitor počítající počet stisknutí červeného tlačítka .....	59
Obrázek 4-13: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (1).....	64
Obrázek 4-14: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (2).....	65
Obrázek 4-15: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (3).....	66
Obrázek 4-16: Sledování průběhu VR sickness v programu CAPTIV .....	76
Obrázek 4-17: Nárůst hodnot subjektu v důsledku frustrace .....	83

## Seznam tabulek

Tabulka 1-1: Přehled jednotlivých periferií VR HMD .....	26
Tabulka 1-2: Porovnání současných VR HMD systémů [71].....	29
Tabulka 4-1: Tabulka průměrných hodnot TS v závislosti na různých kategoriích subjektů..	72
Tabulka 4-2: Tabulka průměrných hodnot $\mu S$ v závislosti na různých kategoriích subjektů ..	78
Tabulka 4-3: Tabulka průměrných časů v závislosti na různých kategoriích subjektů .....	81

## Seznam grafů

Graf 4-1: Pohlavní rozložení subjektů .....	61
Graf 4-2: Věkové rozložení subjektů .....	62
Graf 4-3: Průměrný denní čas strávený subjekty u videoher .....	62
Graf 4-4: Předěšlá zkušenost subjektů s VR .....	63
Graf 4-5: Náchylnost subjektů na kinetózu.....	63
Graf 4-6: Porovnání naměřených hodnot faktorů NASA TLX.....	67
Graf 4-7: Výsledné hodnoty faktoru mentální zátěže na subjekty .....	68
Graf 4-8: Výsledné hodnoty faktoru fyzické zátěže na subjekty .....	68
Graf 4-9: Výsledné hodnoty faktoru časové zátěže na subjekty .....	69
Graf 4-10: Výsledné hodnoty faktoru kvality výkonu subjektů.....	69
Graf 4-11: Výsledné hodnoty faktoru vynaloženého úsilí subjektů.....	70
Graf 4-12: Výsledné hodnoty faktoru frustrace subjektů.....	70
Graf 4-13: Boxový graf SSQ – total score (TS) subjektů .....	71
Graf 4-14: Porovnání jednotlivých podhodnot (N, O, D) dotazníku SSQ .....	73
Graf 4-15: Součet udaných hodnot závažnosti jednotlivých symptomů SSQ napříč subjekty	74
Graf 4-16: Graf subjektu bez náchylnosti na kinetózu (VR sickness uprostřed měření).....	75
Graf 4-17: Graf subjektu bez náchylnosti na kinetózu (VR sickness na začátku měření) .....	76
Graf 4-18: Graf subjektu s náchylností na kinetózu (VR sickness uprostřed měření).....	77
Graf 4-19: Graf subjektu s náchylností na kinetózu (VR sickness na začátku měření) .....	77
Graf 4-20: Typický scénář fluktuujících, avšak konstantně narůstajících hodnot $\mu S$ v čase... 80	

## Přehled použitých zkratk a symbolů

HW	Hardware
SW	Software
VR	Virtual Reality
AR	Augmented Reality
MR	Merged/Mixed Reality
XR	Extended Reality
HMD	Head mounted display
CAVE	Computer Assisted Virtual Environment/Cave Automatic Virtual Environment
LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light Emitting Diode
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
MS	Motion sickness
CS	Cybersickness
VIMS	Visually induced motion sickness
SSQ	Simulator sickness questionnaire
RSSQ	Revised simulation sickness questionnaire
F-SSQ	French simulation sickness questionnaire
CSQ	Cybersickness questionnaire
VRSQ	Virtual reality sickness questionnaire
MSQ	Motion sickness questionnaire
SUS	System usability scale
NASA	National Aeronautics and Space Administration
TLX	Task load index
SMS	Sensory management system
FOV	Field of View
FPS	Frames per second
IPD	Inter-pupillary distance
IQR	Interquartile range
DOF	Depth of field
6DOF	Six Degrees of Freedom
GSR	Galvanic skin response
VAC	Vergence–accommodation conflict
TS	Total Score
μS	Microsiemens

## Úvod

Bariéry mezi digitálním a skutečným světem se takřka každým dnem ztenčují. Ať už se jedná o překonávání vzdáleností, dostupnost informace a online zdroje, nebo komunikační prostředky a sociální sítě. Snaha o digitalizaci všech možných prostředků a služeb, a co nejuvhodnější adaptaci reality v digitální podobě. Skutečný a virtuální svět začíná být jeden od druhého neoddelitelný, a následky v jednom z nich nás pronásledují do druhého.

Jednou z rychle rostoucích novodobých technologií, která přibližuje tyto dva světy blíže než kdy dříve, je v dnešní době takzvaná „Virtuální realita“ nebo zkráceně „VR“.

Ve své dosavadní podobě, představuje VR nástroj pro unikátní možnosti interakce s virtuálním světem, a rozšíření možností informačních technologií. Je využíváno pro vizualizaci modelů či virtuální prohlídky. Uplatnění také nalézá ve vzdělávání, zaučování a tréninku lidí různých profesních zaměření. Technologie VR slouží jak pro účely profesní, kreativní tak zábavní.

Technologie virtuální reality, se v dnešní době potýkají s rizikem výskytu úkazu zvaného také jako „VR sickness“. Podkategorie motion sickness/kinetózy, která byla specificky evokovaná v člověku prostřednictvím virtuální reality. Téma VR sickness je hlavním tématem této diplomové práce a zdaleka není jednoduché. Vyžaduje předešlé znalosti o principu fungování VR a počítačových systémů, stejně tak jako systémů lidských a jejich vzájemná interakce.

Cíle této diplomové práce se skládají z průzkumu aktuálního stavu VR technologií a porozumění úkazu VR sickness, doprovázejícími relevantními informacemi, a praktiky pro mitigaci tohoto úkazu. Tento milník je následován další stěžejní částí, v podobě zúžitkování získaných informací při realizaci měření VR sickness, kde jsou předešlá zjištění aplikována v praxi. Měření zjišťuje, jakým způsobem prezence nebo absence VR sickness ovlivňuje uživatelskou pohodu, výkon, jasnost instrukcí, a jiné obecné dopady na člověka. Výsledky ze získaných dat a poznatků během VR měření dopomohou při hledání způsobů mitigace VR sickness.

V rámci teoretické části, se první kapitola věnuje popisu jednotlivých pojmů a entit figurujících ve virtuální realitě. S tímto dodaným kontextem, jsou následně jednotlivé druhy VR kategorizovány, a vysvětleny jejich rozdíly, principy, využití a problémy. Značná část této kapitoly je věnována právě VR technologii typu HMD. Tento typ VR je v současné době nejpobulárnějším představitelem pojmu VR. Jednotlivé elementy a technologie VR jsou důkladně představeny a vysvětleny, kvůli jejich významnosti v pozdějších kapitolách.

V kapitole druhé se nachází podrobně seznámení s problematikou VR sickness. Je zde obsažen soupis jednotlivých druhů motion sickness, jejich charakteristiky, příklady, a jejich společné nebo naopak rozdílné znaky. Značná část této sekce je věnována faktorům, které hrají roli při VR sickness. Ať již jsou jimi individuální či biologické predispozice člověka, použité VR technologie, nebo jakým způsobem je virtuální prostředí designované. Téma VR sickness má za sebou dlouhou historii a předešlé studie. Avšak téma zůstává relevantní kvůli stále se vyvíjejícím VR technologiím.

Kapitola třetí se zaměřuje na analýzu, průzkum a rešerši dosavadních zjištění ohledně VR sickness a jejímu okolí. Od odborných vědeckých publikací, sympózií, soupisů, univerzitních studií, měření, meta-analýz, webových zdrojů nebo také zdravotnických článků. Je zde možné nalézt kromě teorie a hypotéz, také osvědčená a již implementovaná řešení, která pomáhají s mitigací VR sickness. Ať už se jedná o technologie, praktikách při designu VR světa, až k preventivním opatřením a způsobům léčby. V poslední řadě jsou zde popsány současné populární metody pro měření VR sickness.

Soupisem těchto tří kapitol je shrnut teoretický základ pro seznámení se s tematikou VR sickness, které bude stěžejní při realizaci praktické části této diplomové práce. Praktická část se skládá z měření VR sickness a jeho výsledky. Výsledky jsou porovnány s předchozími studiemi, a společně jsou všechna data zohledněna při hledání řešení problematiky VR sickness. Následuje shrnutí poznatků a hledání nejpřínosnějších současných řešení, společně se shrnutím poznatků a závěrečnými ustanoveními.

V rámci praktické části je kapitola číslo čtyři věnovaná realizovanému VR měření. Nachází se zde popis konceptu, průběhu, subjektů, technologií, a metodik použitých při měření. Získaná data jsou analyzována a interpretována za pomoci několika metodik v samostatných podkapitolách. Jsou představeny a odůvodněny pozorované jevy, a zjištění jsou porovnána s nálezy předchozích studií. Poslední bod představuje konstatování případných problémů a limitací tohoto měření.

Kapitola pátá využívá poznatků z teoretické části, předešlých studií, a také zjištěních z realizovaného měření, pro nalezení možných řešení jevu VR sickness u současných VR systémů. Jednotlivé podkapitoly jsou rozděleny podle faktoru hrajících rolí při VR sickness, jako faktor lidský, technologický, design prostředí a možnosti pohybu ve VR atd. U každého z těchto faktorů jsou prezentována existující tak i doposud nerealizovaná, avšak teoreticky možná řešení.

V poslední šesté kapitole se nachází shrnutí klíčových poznatků diplomové práce. Prezentovány jsou zde v současné době teoreticky nejpřínosnější řešení. V poslední řadě jsou zde konstatovány limitace diplomové práce a doporučení pro budoucí studie.

Tímto je završena praktická část diplomové práce, která slouží pro ověření předešlých zjištění problematiky VR sickness. Předešlá zjištění a daty nasbíranými z realizovaného měření jsou zohledněny při hledáním možných způsobů, jak se s jevem VR sickness v současných VR systémech vypořádat.

# 1 Rozbor světa a problematiky VR

V současné době panuje snaha o propojení skutečného a digitálního světa, nebo nejlépe přiblížit svět virtuální k obrazu světa skutečného. Jednou z těchto technologií je v dnešní době takzvaná „Virtuální realita“ nebo zkráceně „VR“.

V roce 1935, science fiction autor jménem Stanley Weinbaum, představil ve své povídce „Pygmalion's Spectacles“ brýle, schopné přenášet obraz, zvuk a čich svému nositeli. Stvořitel tak prvotní konceptu toho, co by se dalo považovat za první VR head-mounted display. [61]

Skutečný úsvit této technologie se datuje do šedesátých let dvacátého století. Kdy Mortonovo „Sensorama“ spatřilo světlo světa. [18]

Nebo když Ivan Sutherland vytvořil první svého druhu skutečný VR head-mounted display „Sword of Damocles“. [29]

Avšak samotný pojem virtuální realita byl ražen až Jasonem Lanierem v roce 1987. [62]

Technologický rozvoj umožnil, širší dostupnost, komercializaci, a spektrum aplikovatelnost VR. [50]

Převážně v podobě head-mounted display (HMD). Doposud se jedná o technologii stále ranou, a ne zcela standardizovanou. [17]

VR technologie se neobejdou bez svých nedokonalostí a limitů. Od stále značných investiční nákladů při pořizování VR obyčejným člověkem. Přes výpočetní kapacity a meze současného HW a SW. Po reálná rizika a zásahy do zdravý či životní pohody člověka v podobě tzv. „VR sickness“. [18]

První kapitola představuje úvodní seznámení se základními principy, charakteristikami a technologiemi, které jsou spojené se současnými VR technologiemi. Mnohé z nich hrají klíčovou roli v otázce VR sickness.

## 1.1 Virtuální realita (VR)

O virtuální realitě lze hovořit jak obecně, tak i jako o současné konkrétní technologii. Rozlišme tímto tyto dvě eventuality od sebe.

**Obecná definice virtuální reality** jakožto konceptu, se kterou tato práce operuje, zní:

*„Uměle vytvořené prostředí, které je prožíváno skrz smyslový stimulus (např. zrak and zvuk), zprostředkované počítačem, ve kterém akce jednotlivce částečně určují, co se v daném prostředí stane.“ [25]*

**Definice konkrétní technologie VR HMD**, která je v době psaní této práce širokou veřejností nejrozsaňleji asociovaná s pojmem „VR“, zní:

*„Plně imerzní VR ukazuje na používání nositelného displeje, například HMD (Head Mounted Display), pro sledování uživatelských pohybů a prezentace VR informace založené na pozici uživatele, jenž jim umožňuje 360° stupňový zážitek virtuálního světa.“ [18]*

### 1.1.1 Taxonomie VR

VR se obecně dělí na neimerzní, semi-imerzní a plně imerzní. [24], [29]

#### Neimerzní VR

*„Neimerzní virtuální realita je typem VR, ve kterém je interakce s virtuálním prostředím dosaženo převážně skrz počítač, kde je možné ovládat nějaké postavy nebo aktivity během zážitku, avšak virtuální prostředí neinteraguje přímo s námi.“ [24]*

Typickým příkladem neimerzní VR technologie jsou například počítačové hry nebo podobné, uměle vytvořené virtuální prostředí, které vnímáme převážně pouze skrze obrazovky.

#### Semi-imerzní VR

*„Semi-imerzní VR umožňuje uživateli ocitnout se v jiné realitě, a být přesto stále pevně spojen ke svému fyzickému okolí. Technologie si zakládá na vysokém rozlišení a silných simulacích pro poskytnutí realizmu. Tento typ virtuální reality je často používán pro edukativní nebo trénovací záměry.“ [24]*

Tento typ virtuální reality zastupují například pokročilé letecké nebo automobilové simulátory. Některé publikace nepřipouštějí existenci semi-imerzních VR, a řadí simulátory do kategorie neimerzního VR. [19], [22]

Tato diplomová práce uznává že simulátory patří do kategorie semi-imerzních VR technologií.

#### Plně imerzní VR

*„V plně imerzním VR, uživatel cítí, že je fyzicky přítomen ve virtuálním světě a své zážitky by prožíval jakoby z první ruky. Umělé prostředí je vytvořeno za pomoci speciálního zařízení jako VR brýle, tělesné detektory, rukavice, a detektory smyslů.“ [24]*

Příklady plně imerzní VR technologie nalezneme v současnosti v podobě VR headsetů, známých také jako VR HMD nebo také CAVE systémy.



### 1.1.2 CAVE VR

**CAVE** - Computer Assisted Virtual Environment, nebo také Cave Automatic Virtual Environment. [29], [45], [50]

VR systém typu CAVE, je ranou verzí plně imerzních technologií, která je v dnešní době stále využívána, ačkoliv je spíše již upozaděna jinými VR technologiemi. [50]

CAVE si zakládá na využití walk-in čtvercové místnosti, na jejíž stěny jsou z vnějšku místnosti nasměrovány projektory, které vyobrazují jednotlivé části celistvého obrazu virtuálního světa. Tento finální obraz lze pozorovat za pomoci stereoskopických LCD 3D brýlí jako celistvý. [45]

Projekce obrazu může být přímá, nebo za pomoci zrcadel, pokud je k dispozici málo místa v místnosti. Jednotlivci v CAVE místnosti stačí pouze brýle, a tedy je možno pomocí této technologie přenést až několik lidí zároveň do virtuálního světa.

Člověk se stereoskopickými brýlemi uvnitř místnosti vidí obraz kolem sebe jednotně, a vyobrazeným 3D objektem může klidně i procházet. Samotná percepce virtuálního prostředí není však plně izolovaná od reálného světa. Jedinec je stále schopen registrovat okolní realitu a případné ostatní členy skupiny kteří v místnosti jsou společně s nimi. [45]

Samotný běh virtuálního prostředí, jeho ovládání, synchronizace, kalibrace jednotlivých projektorů a jejich obrazů je realizována počítačem. Prostředí lze ze strany člověka v místnosti ovládat uzpůsobeným ovladačem, 3D myší, joysticku, rukavicemi nebo za pomoci svého pohybu. Pohyb člověka může být sledován senzorem/bodem v brýlích, nebo pomocí jiných externích senzorů. Mezi ně se řadí senzory magnetické, optické vícebodové, nebo i infračervené kamery v místnosti. [50]

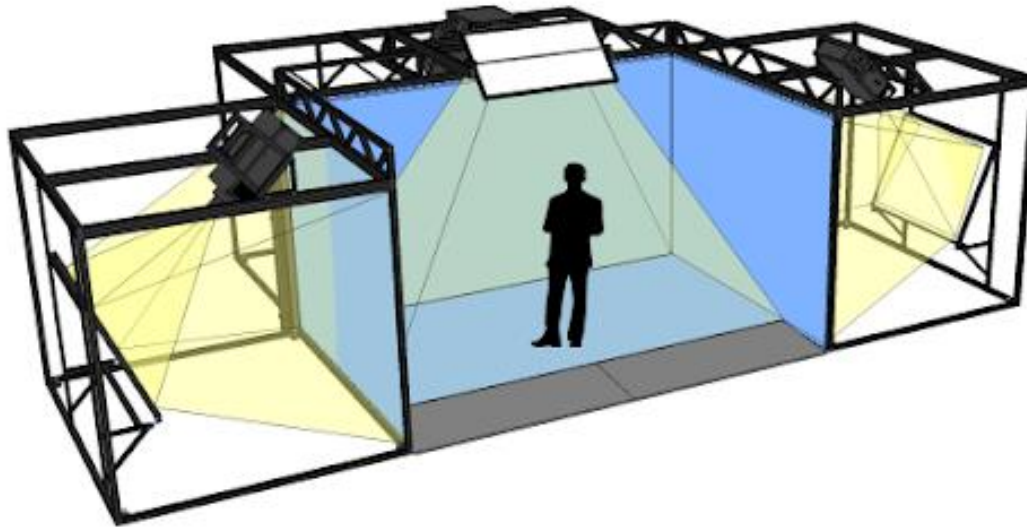
Tato VR technologie zaznamenala úspěchy na poli výuky a vzdělávání. Jedna z velkých předností CAVE je možnost kolaborativního skupinového vzdělávání. [45], [50]

Bylo prokázáno že výuka v CAVE je efektivnější a názornější než z pouhopouhé třídní teorie a klasických knížek. [45]

CAVR však ukazuje své kvality i na poli 3D vizualizace, analýzy, plánování, optimalizace tak i simulace v průmyslu automotive, architektuře nebo i ve video herním světě. [50]

Ve VR typu CAVE je možné se setkat s několika negativními dopady na lidské zdraví jako zvýšený srdeční tep, nevolnost až závratě. [50]

Symptomy korelující s klasickou motion sickness, cybersickness a VR sickness, jejíž prezence by se dala vysvětlit vlivem stereoskopické technologie, špatného FOV, latence, individuálními biologickými predispozicemi, nebo zdravotními faktory jedince. [4], [5], [8], [12]



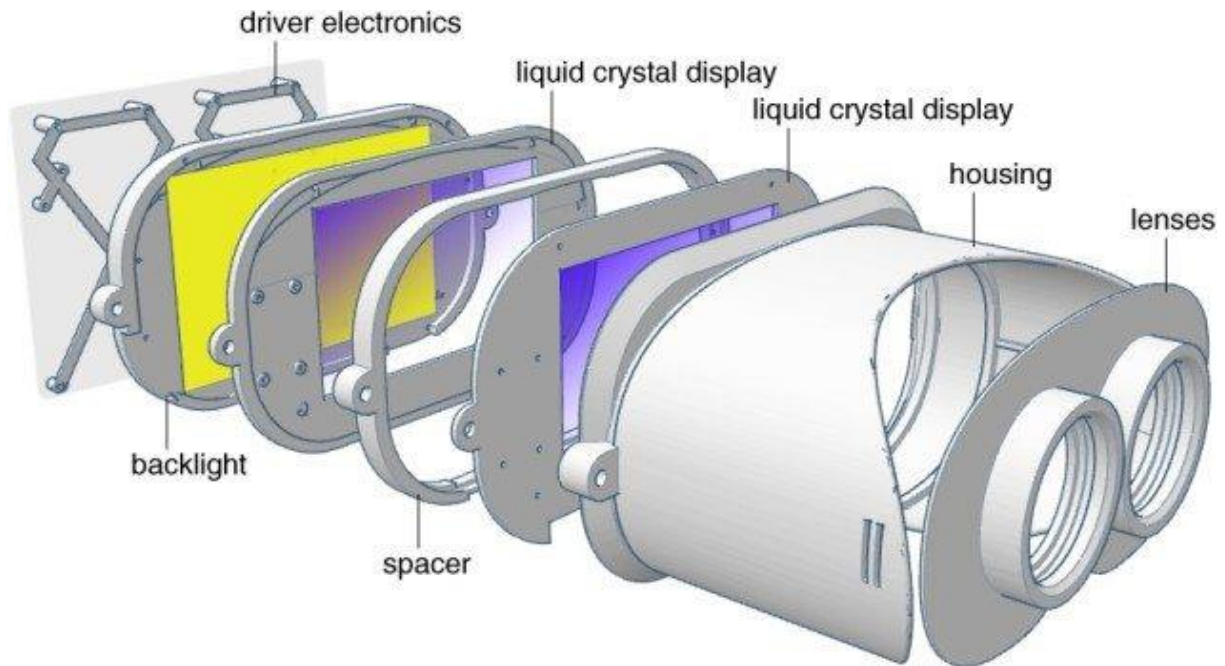
Obrázek 1-1: Vyobrazení místnosti pro VR systém typu CAVE [63]

### 1.1.3 HMD - Head-mounted display

HMD, a jeho případné doplňující periferie, v současné době primárně zastupují doménu imerzních VR technologií. Klíčovým zařízením je zde vizor/hledí upevněné na hlavě člověka, jenž zakrývá jejich oči, anuluje percepci skutečného okolí, a přenáší obraz virtuálního světa do očí člověka na displejích uvnitř headsetu. Jak pohybem, tak otáčením hlavou nebo celým tělem, se může člověk rozhlížet a přemísťovat ve virtuálním prostředí. HMD může být doprovázené o několik periferních zařízení jako senzory pohybu nebo ovladače s haptickou odezvou, umožňující interakci s virtuálním prostředím a objekty. Počet a potřeba jednotlivých periférií se může lišit v závislosti na provedení, výrobci nebo použité technologie. [17]

Moderní VR headsety si vypůjčují mnohé technologie z jiných odvětví a produktů. Od chytrých telefonů si přebírají technologii jako je například gyroskop, akcelerometry, kompas, nebo senzory pro snímání obličeje, hlavy, rukou, pohybu těla apod. Najde se zde i zobrazovací 3D displej technologie využívající stereoskopické obrazovky které zobrazují jednotný 3D obraz na podobném principu jako mikroskopy. A také kompaktní, lehké, a přesto výkonné procesory. [17], [22]

VR headsety svým dosavadním provedením neumožňují vyplnit celé zorné pole člověka. Využívají proto čoček umístěných mezi okem a displejem, aby kompenzovali za limitující zorné pole a velmi krátkou vzdáleností mezi okem a samotným displejem, pro vytvoření stabilního a příjemného obrazu. Je využíváno dominantně tenkých Fresnelových čoček jako v případě HTC Vive, Oculus Rift nebo PSVR, opatřených centrujícími kruhy pro lepší ohyb světla. [31]



Obrázek 1-2: Vnitřní struktura VR HMD systému [64]

VR HMD je běžně doprovázeno ovladači, které uchopí člověk do rukou, umožňující interakci s virtuálními objekty podobně jako lidské ruce. Většinou designované ve tvaru ergonomického držadla pro co nejpohodlnější úchop. Po jejich obvodu jsou rozmístěny ovládací prvky jako páčky, joysticky, a tlačítka. Některé ovladače jsou opatřeny také haptickou odezvou (vibrace) v závislosti na právě prováděné akci ve VR. Tyto ovladače nemusí být vždy potřebné, pokud samotný headset disponuje kamerou, a technologií pro rozeznání lidských rukou v zorném poli kamery. Toto HMD dovede rozeznat a interpretovat ruce jako samotný ovládací prvek ve virtuálním prostředí. Příkladem je například Meta Quest 2 a 3. [32]



Obrázek 1-3: Design ovladačů doprovázejících VR HMD [65]

## Technické parametry HMD

### Způsob provedení

**Standalone** – HMD je schopno samostatného provozu, bez potřeby připojení externí výpočetní jednotky (počítač). VR aplikace běží přímo na hardwaru uvnitř HMD. [49]



Obrázek 1-4: VR HMD typu standalone [66]

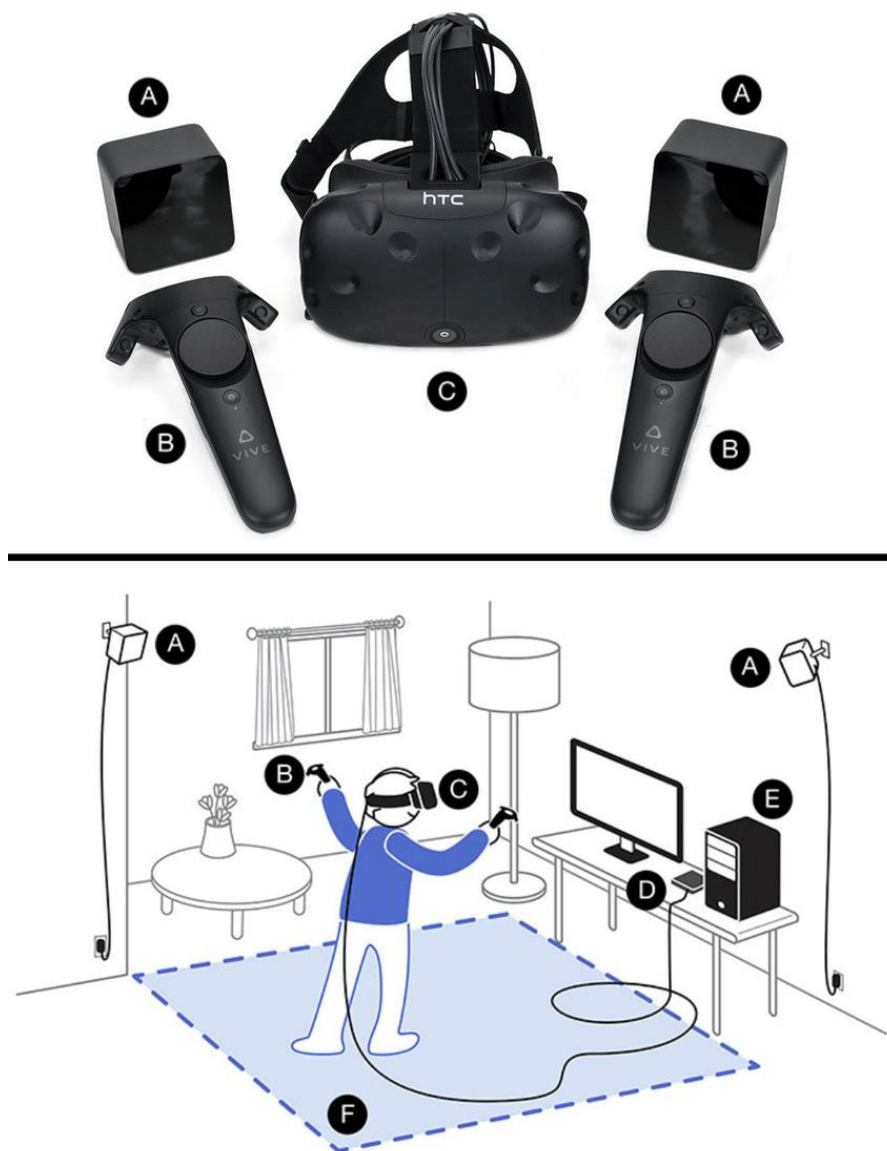
**Tethered** – HMD je nutno být připojeno k externí výpočetní jednotce, jako například počítač, který vykonává potřebné výpočty, obsluhu procesů, a je na něm spuštěn samotný VR program. Finálový obraz je následně přenášén do HMD. [49]



Obrázek 1-5: VR HMD typu tethered [67]

## Způsob snímání pozice

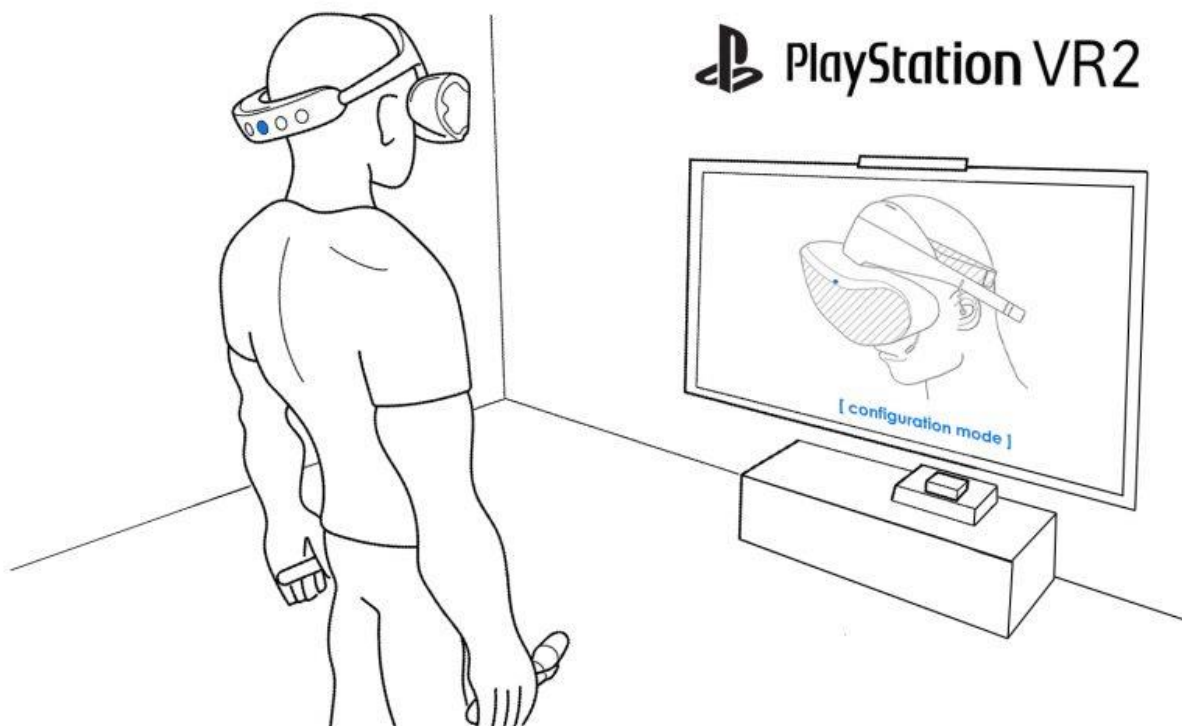
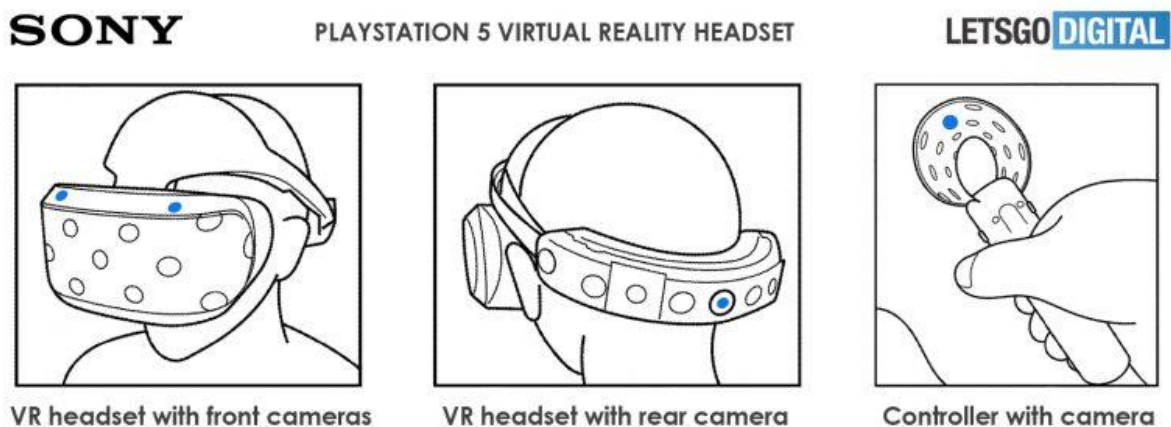
**Outside-in** – přístup externího snímání pozice člověka v určitém úseku. Vyžadující dostatečný vyhrazený prostor s jasným výhledem na HMD, ve kterém má člověk možnost se volně pohybovat. Celá tato volná pohybová plocha je snímána většinou dvěma senzory známými také jako „base stations“, umístěny ve dvou rozích naproti sobě ve vymezeného prostoru. Base stations snímají pozici a pohybové akce jedince v reálném světě a přenášejí je do virtuálního světa. Pokud by jedinci hrozilo vystoupení ze snímání plochy, zobrazí HMD danému člověku hranice snímání v jeho VR pohledu. Mnohdy v podobě mřížované stěny klece, aby jedince odradily z vystoupení ze zóny snímání. [49]



Obrázek 1-6: Sestava VR systému s outside-in snímáním [68]



**Inside-out** – přístup interního snímání pozice člověka v určitém úseku. Tento styl snímání využívá zabudované senzory nebo kamery, přímo v HMD. Odtud snímají okolní prostředí pro určení své vlastní pozice relativně vůči okolnímu prostředí. [49]



Obrázek 1-7: VR HMD s inside-out snímáním [69]

## Typy displeje

**LCD** – Výhodou těchto displejů je jejich široká dostupnost a nižší cena. Nevýhodou je zde však neautentické zobrazování černých nebo tmavších barev. [48], [49]

**OLED** – Tento typ obrazovky poskytuje vysoký barevný kontrast, lepší pozorovací úhly, rychlejší obnovovací frekvenci, a tenčí obrazovku s jednodušší konstrukcí. Každý pixel je svůj vlastní zdroj světla, a tak je dosaženo menší spotřeby energie. Tyto pozitivum jsou však doprovázeny větší cenou. [48], [49]

**AMOLED** – Displej s vlastnostmi OLED, doplněný však o Tento typ obrazovky poskytuje vysoký barevný kontrast, větší obnovovací frekvence a možnost plného vypnutí individuálních pixelů. [48], [49]

## Rozlišení

Uváděné v (PPE – Pixels per eye)

VR headsety operují na principu stereoskopie. Obraz je promítán ve dvou oddělených zobrazeních do každého oka zvlášť. Výsledným efektem je iluze jednotného obrazu v očích člověka. Displeje jsou svojí velikostí relativně malé při porovnání s klasickými počítačovými monitory. Avšak hustota pixelů je mnohdy vyšší než u klasických Full-HD obrazovek, podobně jako u chytrých telefonů. Jednotlivé displeje se mohou pohybovat v rozmezí od 1440x1600px (Valve Index), do 4896 x 2448px (HTC Vive Pro 2). [32]

Rozlišení je důležitý parametr ve VR technologiích. Malé rozlišení způsobuje že pouhým okem lze snáze vidět jednotlivé pixely, tudíž obraz není tak ostrý, což může mít dopad na autenticitu, a úroveň imerze ve virtuálním světě. [49]

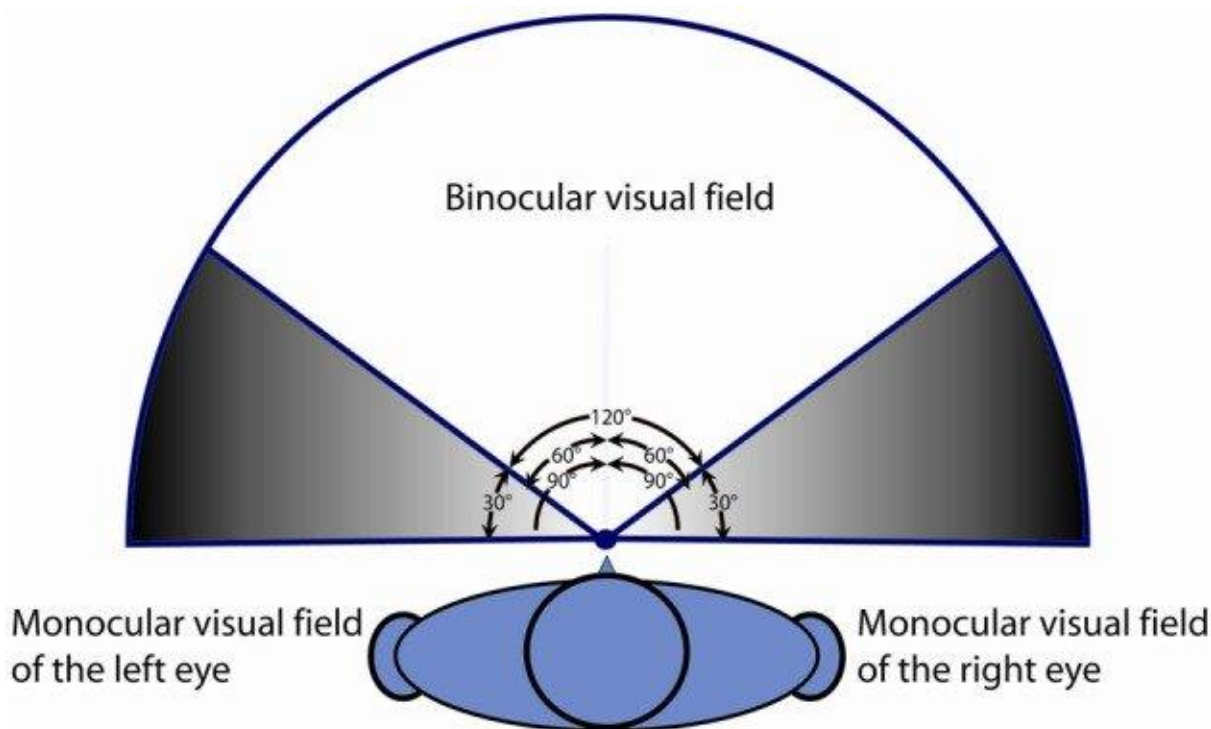
## Zorné pole (FOV)

Uváděné ve stupních (°)

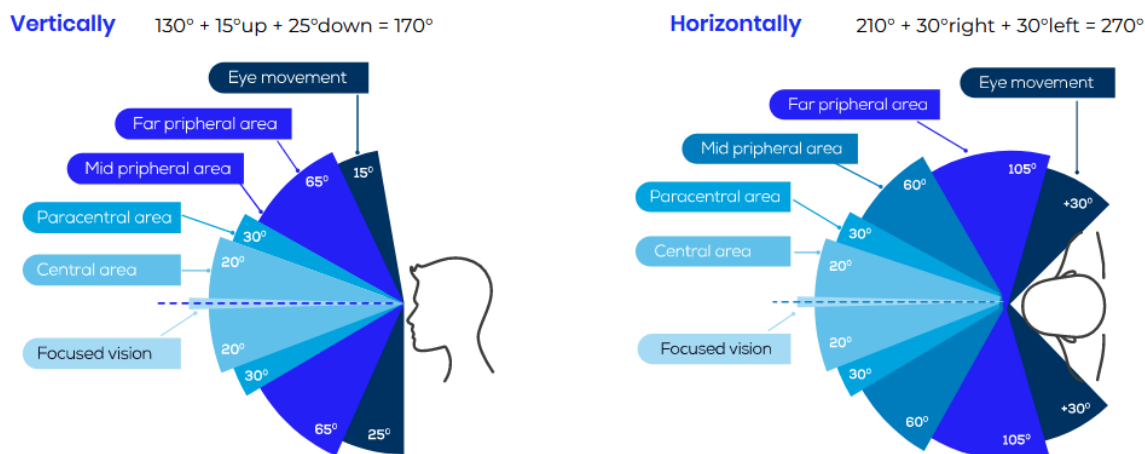
FOV odkazuje na maximální plochu kterou je možno v jeden daný okamžik vidět. Je zde nutno rozlišovat zorné pole jednotlivé (monokulární), a kombinované zorné pole (binokulární). Větší FOV poskytuje více imerzní zážitků. [29]

Jednotlivé lidské oko má své monokulární zorné pole přibližně 135°. Celkové (Binokulární) horizontální zorné pole lidského zraku je vyjádřeno vpřed směřujícím obloukem, s přibližným úhlem 200-210° bez rotace očí (s rotací až 270°). Vertikálně mají lidské oči rozsah přibližně 130-135° bez rotace očí (s rotací až 170°). [33]

Monokulární zorné pole levé a pravé obrazovky/oka se v určitém bodě protínají, a tvoří tím binokulární úhel cca 120°, který je zabírán oběma displeji/bulvami zároveň. Výsledkem je iluze jednotného obrazu. Velikost zorného pole se liší mezi jednotlivými HMD a jejich konstrukcí. U binokulárního zorného pole HMD se můžeme typicky setkat s horizontálními hodnotami (šířkou) zorného pole v rozsahu od 90° až po 135°. Vertikální zorné pole se pohybuje v přibližném rozsahu od 90° - 110° Naleznou i však takové HMD, které slibují až 200° horizontální FOV a 135° vertikální FOV jako Pimax Reality 12K QLED. [32]



Obrázek 1-8: Monokulární a binokulární zorné pole člověka [70]



Obrázek 1-9: Horizontální a vertikální zorné pole člověka [31]

## Obnovovací frekvence

Uváděná v Hertzích (Hz)

Obnovovací frekvence udává maximální možný počet vykreslených snímků na displeji za sekundu. Tedy 60 Hz, odpovídá právě 60 snímků, které se postupně vyobrazí na obrazovce v rámci jedné sekundy. Kde FPS udává současný počet snímků za vteřinu, obnovovací frekvence udává horní limit/hranici zobrazování těchto snímků.

Standardní současné kancelářské monitory se pohybují v pásmu 59 až 60 Hz. Náročnější monitory poté 144Hz až 240 Hz. V případě VR je obnovovací frekvence klíčovým faktorem pro plynulost a autentičnost imerze ve virtuálním světě. Je zde proto kladen důraz na vyšší obnovovací frekvence, v řádu od 90 až 144 Hz a více. [49]



## **Snímky za vteřinu**

Uváděná jako FPS (Frames per second)

Celé číslo symbolizující současný počet vykreslených snímků za vteřinu. Standardem pro zaručení plynulosti obrazu je dosažení 60 FPS.

FPS je odvíjeno od výpočetních rychlostí a kapacit daného HW, nebo od náročnosti aplikace a její optimalizace. Vyšší hodnoty FPS zajistí plynulejší obraz, a tím pádem lepší imerzi do virtuálního prostředí. Nízký počet snímků nebo náhodné silné změny v FPS tuto imerzi naopak ničí. Vyšší FPS nezajistí plynulejší obraz, pokud nemá zobrazovací zařízení dostatečnou obnovovací frekvenci. V tomto případě, kdy  $FPS > Hz$ , jsou některé snímky přeskočeny, jelikož zobrazovací zařízení je nedokázalo včas vyobrazit.

## **Váha**

Uváděná v gramech (g).

Váha HMD představuje zátěž, která je konstantně kladena na hlavu a krk během jeho nošení. VR systémy se proto snaží minimalizovat váhu HMD. Čím více HMD zařízení váží, tím obtížněji je manévrovatelné, ovlivňuje rozmezí pohybů, a také přijatelnou mrštnost/prudkost jednotlivých pohybů. Při vyšší váze se může také v závislosti na fyzické houževnatosti a toleranci zátěže ze strany nositele, dostavit nutnost častějších přestávek. Nošení těžkého HMD po prodlouženou dobu může brzy vést k fyzické únavě a přílišné namáhání hlavy a krku, vedoucí k možným bolestem až křečím v oblasti krku a ramen. [9], [18], [30]

Přílišná váha HMD má negativní dopady na pohodlí člověka bez ohledu na to, jakou aktivitu ve VR provádí. [4]

HMD bývá pouze jedna z více komponent daného VR systému. Někdy se jedná o komponenty, které pouze doplňují zážitek, ale existují i takové které jsou nutné pro samotnou funkčnost a kompletují tím daný VR set. Jejich potřeba nebo kompatibilita se liší mezi jednotlivými výrobci. Váhu těchto komponentů je nutno také brát v potaz.

<i>Periferie</i>	<b>Potřeba</b>	<b>Funkce</b>
<i>HMD</i>	Povinná	Brýle schopné přenést obraz virtuálního světa do očí člověka.
<i>HMD Kamera/senzory (Outside-in tracking)</i>	Nepovinná (U headsetu bez ovladačů povinná)	Součást headsetu schopná sledovat pozici/polohu člověka a jeho rukou, které převede do virtuálního prostředí, nahrazujíc tak ovladače a snímače
<i>Mikrofon</i>	Nepovinná	Součást headsetu zaznamenávající řeč člověka nebo okolní zvuk
<i>Ovladače</i>	Nepovinná (U headsetu bez kamery povinná)	Separátní periferie, držaná v ruce člověka, simulující ruce, a umožňující ovládání, navigaci a interakci s virtuálními objekty
<i>Base station/Snímače (Inside-out tracking)</i>	Nepovinná (U headsetu bez kamery povinná)	Separátní periferie sledující pohyb člověka ve vymezeném reálném prostoru, a jeho přenesení do virtuálního prostoru
<i>Externí výpočetní jednotka (Počítač)</i>	Nepovinná (U tethered VR headsetů povinná)	Separátní periferie provádějící potřebné výpočty a běh programu, jehož obraz je přenášén do VR headsetu kabelem

**Tabulka 1-1: Přehled jednotlivých periferií VR HMD**

#### 1.1.4 Využití a přínosy virtuální reality

Plně imerzní virtuální realita ať již v podobě CAVE nebo HMD, poskytuje unikátní pohled a způsob interakce s digitálním světem. Ačkoliv tyto současné VR technologie stále nejsou dostatečně vyvinuté, nebo jsou relativně nákladné. [19]

To však neodradilo mnohé od nalezení důvtipného využití této technologické inovace. Implementace současných systémů virtuální reality byla pozorována na širokém spektru průmyslů a oblastí. [1], [7], [19], [24], [21], [45]

Obecně se dá říct, že primárními přínosy, které VR přináší, jsou: VR trénink, ušetření času a finančních prostředků. Lze skrz VR vzdáleně operovat. Informace vstřebaná skrz VR je díky své vizualizaci lépe zapamatovatelná. VR zjednodušuje komplikované koncepty a situace. Ale je také užitečné ve výuce a kreativním rozvoji. [29]

#### Zábavní a videoherní průmysl

Videoherní odvětví bylo právě jedno z prvních, kde byl potenciál této technologie viděn a rozvíjen dál. [18], [19]

Dominantními vývojovými platformami pro tvorbu VR aplikací jsou v současnosti programy jako Unity nebo Unreal Engine, které již disponují svými vlastními VR knihovnamí a dokumentací. [17]

Mezi nejpopulárnější a nejúspěšnější VR videoherní aplikace se řadí tituly jako Blade & Sorcery, Superhot VR, Half-Life: Alyx nebo zdaleka nejvýdělečnější z nich, "Beat Saber". [47]

#### Vzdělávání

Díky virtuální realitě lze pojmout výuku více interaktivní a zábavnou formou. Virtuální realita slouží pro výuku kultury, armádní trénink, praktický trénink zdravotního personálu, zaškolování zaměstnanců, nebo také skupinové učení a další. [7], [9], [19], [24], [29], [46]

Ukazuje se také že vizualizace a zážitky praktických situací ve VR, jsou efektivnější při učení než pouhá teorie. [29], [45]

#### Sport

VR lze využít k zábavné formě sportování a cvičení, díky videohrám nebo jiným pohybovým aktivitám. VR se ukázalo efektivní pro trénink sportovců, analyzování sportovních utkání či budování strategie při sportu. [29]

O zapojení VR tréninku se pokoušeli už i trenéři fotbalových týmů. [24]

#### Obchod

Módního průmyslu při online nakupování využívá skenování těla pro vyzkoušení si jednotlivého oblečení, brýle, nebo účes a make-up. [24], [29]

Současné smartphony disponující AR kamerou dokáží přenést 3D modely nábytku do interiéru domovů, před samotným rozhodnutím člověka o nákupu. [35]

## **Zdravotnictví**

Zdravotnictví využívá VR systémů pro zcvik svého personálu bez risku skutečné újmy na zdraví nebo spotřeby zdravotnického materiálu. [24]

Zdravotnictví využívá VR modelů a simulací pro nácvik lékařských zákroků na budoucích skutečných lidských tělech, nebo také pro trénink paramediků. [7], [29]

Terapeutové používají k snižování stresu, úzkostí nebo PTSD tzv. “Virtual reality exposure therapy”. [29]

## **Vědecké odvětví**

VR umožňuje demonstraci modelů, vizualizaci abstraktních konceptů a snazší vysvětlování komplexních informací publiku. [29]

Vzdálené virtuální třídy a laboratoře dopomáhají dokončení výzkumů jak studentům, tak profesionálům. [29]

## **Armádní a vojenské využití**

VR se používá pro bojové simulace a pro trénink armádního personálu. [19], [29]

## **Logistika**

Augmentovaná realita našla svá uplatnění ve skladech a přepravních společnostech. Zde dopomáhá k zaškolování zaměstnanců, navigaci po skladech, kontrolu dodávek, údržbu a asistenci v případech nouze. Zvedá tím efektivitu a bezpečnost provozu. [41]

## **Výrobním průmyslu**

Automobilový průmysl využívá VR pro experimentování a designování, bez potřeb papírů nebo výrobních plánů. Auta a jiné produkty mohou být ukazovány ve virtuálních prohlídkových galeriích a vyzkoušeny zájemci ve VR. [24]

VR poskytuje svým prostředím nové pohledy, umožňuje analýzy problémů a testování před samotnou implementací ve skutečnosti. Snižující tak rizika selhání. [29]

## **Architektura**

VR poskytuje nové rozměry, pohledy, a způsoby jakými pracovat s 3D objekty. Architekti využívají VR jako možnost náhledu na projektované domy zvenčí tak také zevnitř. Užitečné při projektování a virtuálních prohlídkách. [29]

## **Kultura**

Muzea a výstaviště využívají VR k digitalizování nebo zatraktivnění svých expozic. [19]

Využívané je také k turistice a cestování z pohodlí domova. Google Expeditions využíval VR pro umožnění této skutečnosti. Avšak v současné době již není dostupné. [29], [24]

### 1.1.5 Limity, problémy a úskalí

#### Technické problémy:







VR technologie stále nemají potřebnou standardizaci, která by dopomohla k rychlejší adaptaci a rozvoj této technologie napříč průmysly. Vývojová prostředí a samotné VR systémy nejsou dostatečně kompatibilní mezi sebou nebo periferními zařízeními třetích stran. VR aplikace operující na jednom systému nemusí nutně spolupracovat s druhým. Snahy o cross-platform podporu jsou však vydávány. [18]

Pořizovací cena HW jednotlivých VR systému je stále poměrně vysoká pro prostého jednotlivce. [18], [32]

Nutno připomenut ze HMD typu "tethered" jako např. Valve Index nebo HTC Vive, vyžadují ke svému provozu dostatečně výkonný počítač, ke kterému budou připojeny. Tato skutečnost se může ještě více promítnout na celkové ceně VR sestavy.

Navigace a pohyb ve VR jsou omezené v rámci vyhrazeného prostoru skutečného světa. Tento prostor bývá dostatečný pro krátké úkroky a otáčení, nikoliv však pro zcela volný pohyb. K překonání větších vzdáleností ve virtuálním světě, musí člověk svým virtuálním avatarem nebo kamerou ve VR, teleportovat z místa na místo. Alternativní možností je pohyb za pomoci ovladače. Imerze není tedy zcela dokonalá. [17]

Technologie VR je v současné době stále ve vývoji. Neexistuje jednoznačné perfektní řešení, které by eliminovalo veškerá rizika, bariéry nebo nedostatky. Vývojáři a výrobci musí tedy dělat kompromisy ve svých produktech, jelikož VR je stále drženo zpátky technickými limity současné doby. Porovnání parametrů a technických specifikací lze vidět v přiložené tabulce. [32]

THE WILD IMMERSIVE COLLABORATION FOR TEAMS		2022 Business VR Headset Comparison Chart (Q1)					
	Meta Quest 2	Pico Neo 3	HP Reverb G2	Valve Index	Vive Pro 2	Vive Pro	
							
Official Support in The Wild	✓	✓	✓	✗	✗	✓	
Resolution / Eye	1832 x 1920	1832 x 1920	2160x2160	1440x1600	2448 x 2448	1440x1600	
Refresh Rate (HZ)	90/120	90	90	144	120	90	
Field of View	100°	98°	114°	130°	120°	110°	
Weight	503g	620g	544g	570g	850g	563g	
Tracking	Inside-out	Inside-out	Inside-out	Base Stations (more equipment = more precise hand tracking)	Base Stations (more equipment = more precise hand tracking)	Base Stations (more equipment = more precise hand tracking)	
Type	Standalone (no wires, less powerful processor) + option to wirelessly stream or tether to a PC with a cable	Standalone (no wires, less powerful processor) + option to wirelessly stream to a PC	Tethered (wired to your PC, more powerful, can run larger models)	Tethered (wired to your PC, more powerful, can run larger models)	Tethered (wired to your PC, more powerful, can run larger models)	Tethered (wired to your PC, more powerful, can run larger models)	
Price	\$299	🏠 \$699	\$599	\$999	\$1399   🏠 \$1599	\$1199   🏠 \$1399	
Summary	A great standalone headset for personal or business use. What you lose in processing power you gain in easy setup and freedom of movement. AirLink and the Link cable makes this a great option for running larger models as well.	A fantastic Enterprise standalone (or optional PC-streaming) headset focused on privacy and control, with ability to deploy software through Multiple Device Managers.	An affordable, high-res, tethered headset for running large models from your PC.	A top-of-the-line gaming headset. Base stations and wires require more setup and configuration, but create a smooth and powerful experience in-headset.	A top-of-the-line gaming headset. Base stations and wires require more setup and configuration, but create a smooth and powerful experience in-headset.	An older but still powerful gaming headset. Base stations and wires require more setup and configuration, but create a smooth and powerful experience in-headset.	

Tabulka 1-2: Porovnání současných VR HMD systémů [71]

### **Zdravotní hazardy:**

Nátura HMD spočívá v krátké vzdálenosti mezi okem a obrazovkou. Podobně jako u klasických monitorů, i zde je riziko že při dlouhodobém vystavování zraku vůči zobrazovacímu zařízení v rámci jednoho sezení, může způsobit značnou námahu očí až dočasné komplikace se zrakem. [34]

Tato technologická limitace může navíc vést k pocitům nevolnosti. [18]

Již dříve zmíněná váha VR HMD systémů působí značný problém. Jejich nošení po prodlouženou dobu může brzy vést k fyzické únavě, a přílišné namáhání hlavy a krku, vedoucí k možným bolestem až křečím v oblasti krku a ramen. [9], [18], [30]

Eliminace percepce okolního prostředí, v kombinaci s imerzí člověka ve VR, může vést vlivem nepozornosti k řadě nehod, pádům, zraněním, nebo zbytečným škodám. [1], [34]

Přivyknutí si na reakční dobu displeje VR headsetu může vést k dočasné "desynchronizaci" s reakční dobou jedince zpět ve skutečného světě. [34]

Risk kontrakce jiných fyzických komplikací jako zvýšený srdeční tep a potíže s dýcháním. [34]

## 1.2 Augmentovaná realita (AR)

Definice augmentované reality (AR):

*„Vylepšená/obohacená verze reality, vytvořená překrytím digitální informace na obraz něčeho, co je pozorováno skrz zařízení, využitím technologie (např. kamera chytrého telefonu)“ [26]*

Pojem augmentovaná realita razil Ronald T. Azuma již v roce 1990, a definoval jí jako systém který kombinuje skutečný a virtuální svět. Je interaktivní v reálném čase. A je realizována v 3D prostoru. [19]

Augmentovaná realita si zakládá na pozici, směru otočení člověka, a takzvaného “markeru” nebo značky která je položena do prostoru. Na pozici této virtuální značky je poté vykreslen virtuální objekt, který je možný za pomoci zobrazovacích prostředků AR technologie nebo aplikace sledovat, a třeba i ovládat. [40]

Augmentovaná realita, ačkoliv se některé její aspekty protínají s VR, se řadí do své vlastní kategorie. VR headset plně zakrývá oči nositelem a snaží se o maximální imerzi člověka do virtuálního světa, během současné snahy o co největší odloučení od světa skutečného. [45]

Augmentovaná realita se snaží naopak o udržení člověka v reálném světě, který ovšem doplňuje o počítačem generované digitální prvky. [29]

Augmentovaná realita lze být pozorována skrz HMD zařízení, chytré brýle, holografické displeje, nebo chytrým telefonem. [29]

AR poskytuje unikátní způsob získání informace o určité věci, v určitém okamžiku, místě, nebo při události. Řadí se sem například ukazatele cesty, zvýrazňovače, 3D objekty, vyskakující okénka, informační tabulky, obrázky a videa, hovory, zprávy a jiná upozornění.

Augmentované reality je již v současné již schopen i chytrý telefon. Mobilní augmentované reality je využíváno například pro zobrazení digitálního 3D modelu v prostoru, jako třeba nábytek. [35]

Slouží pro měření vzdálenosti, tvorbu AR kreseb, 3D sken, nebo tvorbě animovaných virtuálních postavicek za pomoci AR skenování obličeje uživatele. [36]

Vzdělávací mobilní aplikace, schopné rozpoznat okolí a doplnit jej o užitečné informace o právě pozorované věci, jako například aplikace SkyView® Lite nebo Stellarium pro pozorování noční oblohy. [37], [38]

AR je také silně využíváno v sektoru mobilních her jako Pokemon:GO, umožňují chytat, pečovat a krmit Pokémony ve svém okolí v AR módu. [39]

Existují také AR systémy pracující na principu HMD, podobně jako plně imerzní VR systémy. Rozdíl je zde ten, že AR brýle mohou být podstatně menší a jednodušší ve svém provedení oproti VR HMD. AR HMD funguje jako standalone zařízení, a nevyžaduje tak žádné dodatečné periferie, ani připojená zařízení. Samotný AR vizor brýlí je průhledný, a umožňuje tak očím člověka, aby se primárně soustředily na realitu. Z vnitřní části AR brýlí/vizoru je pozorovaný reálný svět obohacován o virtuální položky.

Využití AR jsou mnohá. Řadí se zde již dříve zmíněné mobilní videohry, online nakupování, nebo vzdělávací AR aplikace. AR technologii lze také využít pro virtuální prohlídky muzeí a kulturních míst, nebo jejich zatraktivnění obohacením je o dodatečnou virtuální složku. [19]

Lze využít AR pro trénink, zaměstnanců, údržbu a přehled o zásobách, a obecné optimalizaci logistiky ve skladech. [41]

Pro školení zaměstnanců, kontrolu kvality, vzdálené služby, nebo asistované konzultace/servis na produktech. [42]

I augmentovaná realita s její omezenou virtuální složkou, představuje potenciální riziko. AR HMD navzdory průhlednosti svých vizorů a podstatně nižší úrovni vystavení virtuálnímu obsahu, může za určitých podmínek zapříčinit vážné symptomy visually induced motion sickness (VIMS). [43]



Obrázek 1-10: AR brýle zobrazující virtuální prvek [72]



### 1.3 Smíšená/Mixed realita (MR)

Definice Mixed reality (MR):

*„Směsice prostředí skutečného světa a počítačem generovaného obsahu, pozorovaném na obrazovce nebo jiném zobrazovacím zařízení, ve kterém virtuální obsah a fyzické prostředí koexistují a reagují na sebe navzájem v reálném čase.“ [27]*

Po vzoru augmentované reality se i realita smíšená kategorizuje do své vlastní škatulky.

Smíšenou realitou rozumíme hybrid mezi virtuální realitou a augmentovanou realitou. AR složka je zde reprezentována v průhledném vizoru HMD, který zobrazuje virtuální objekty v reálném prostoru. VR část zde představuje chování a interakce s vytvořenými virtuálními objekty, společně s imerzí. Snaha smíšené reality je ve vytvoření prostředí, ve kterém reálné a virtuální objekty mohou docílit vzájemné interakce. Konkrétní příklad může být třeba virtuální 3D model kočky, která volně běhá po místnosti a přizpůsobuje se překážkám. [44]



Obrázek 1-11: Vizualizace objektu ve smíšené realitě [73]

Využití pro mixed realitu najdeme v opět v zábavním průmyslu. HMD Magic leap, umožňuje hrát strategickou videohru Angry birds FPS, kde s užitím virtuálního praku s opeřenou municí, lze ničit vygenerované hrady prasátek u sebe doma, a tvořit tak unikátní úrovně [44].

Nabízí se také možnosti vzdálené kolaborace týmu na projektech. Interakce s virtuálním 3D modelem, a kolaborace na něm s ostatními lidmi s MR hedsetem. V neposlední řadě existují možnosti již dříve prezentované augmentovanou realitou, jakožto trénink a zaučování lidí, vzdálená podpora, a unikátní možnosti vizualizace a pohledu. [45]

Smíšená realita představuje spektrum mezi realitou augmentovanou a virtuální. [45]

Lze očekávat že i zde panuje riziko pro kontrakce symptomů visually induced motion sickness (VIMS), podobně jako u augmentované a virtuální reality. [43]

## 1.4 Simulátory

Definice Simulátoru:

*„Zařízení designované pro reprezentaci skutečných podmínek, například v letadle nebo vesmírném plavidlu.“ [28]*



Obrázek 1-12: Vnitřní pohled z kabiny leteckého simulátoru [74]

Tento typ VR je někdy kategorizován jako semi-imerzní VR. Jinde však jako neimerzní VR. [19], [22]

Simulátory se řadí do sféry semi-imerzních až neimerzních systémů, z důvodu stálé prezence reálného světa. Rozdíl oproti plně imerzní technologii jako VR HMD, kde je vizuální a zvuková percepce reality omezena. [22], [24]

V případě simulátorů mluvíme o aparátu, který funkčně, nebo co nejvíce autenticky reprezentuje svoji reálnou předlohu. Může být doprovázen setem monitorů nebo jiných neimerzních zobrazovacích zařízení, které prezentují uživateli simulované scénáře a události, které jsou odrazem skutečnosti, ve virtuálním světě. [18]

Často se s těmito aparáty setkáme jako cvičné trenažéry pro piloty, řidiče a cyklisty nebo armádní personál. [18]

V minulosti bylo prokázána prezence tzv. “Simulator sickness” nebo “Simulator induced motion sickness”, která se řadí do své vlastní kategorie, a jejíž výzkum byl vztahován převážně na letecké simulátory. [10]

Jak je z názvu patrné, simulator sickness nastává v jedincích po určité době nebo činnostech v různých druzích simulátorů. Lze očekávat že studii faktorů a korelací mezi simulator sickness, motion sickness, a VR sickness, může poskytnout značné informace pro nalezení společných faktorů, a řešeních pro eliminaci VR sickness.

## 2 Charakteristika VR sickness

Plně imerzní VR systémy současné doby se potýkají s fenoménem takzvané „VR sickness“. Známa také pod termínem „Cybersickness“. V jednotlivých sekcích této kapitoly bude téma VR sickness podrobněji rozebírané. Terminologie, charakteristické projevy, symptomy, příčiny, a do jakých mezí je srovnatelná s již známou motion sickness nebo simulator sickness.

Podstatné zde je seznámení se samotnou podstatou VR sickness, taxonomií a rozlišení jednotlivých „sickness“, a jejich symptomy. Jejich společné nebo rozdílné vlastnosti. A také zjištění technických, designových, nebo lidských faktorů, které při VR sickness hrají roli.

### 2.1 Sickness - taxonomie, definice, popis

Terminologie tohoto tématu není vždy jednoznačná. Obzvláště mezi termíny „VR sickness“ a „Cybersickness“. V rámci této diplomové práce jsou jednotlivé pojmy rozlišované, ačkoliv napříč literaturou jsou pojmy „VR sickness“ a „Cybersickness“ typicky zaměňované jeden za druhý, a je třeba hledět spíše na kontext. [13]

#### Motion sickness/Kinetóza

*„Motion sickness je pocit nevolnosti, zapříčiněný pohybem, obzvláště během cestování nebo imerzi ve virtuální realitě.“ [53]*

Motion sickness, známá též pod názvy jako „Kinetóza“, „Cestovní nemoc“ či „Nemoc z pohybu“, nastává v jedinci během konfliktu smyslů. Když pohyb registrovaný očima, je v nesouladu s pohybem skutečným nebo pohybem registrovaným vestibulárním systémem, svaly a klouby těla. Tento konflikt smyslů je popisován v tématice „Sensory mismatch theory“, která je v současné době brána za nejpravděpodobnější vysvětlení motion sickness. [53], [54], [59]

Motion sickness může nastat například při plavbě na moři (Seasickness), letadlech (Airsickness), při jízdě autem (Carsickness), a také při hledění do obrazovek (Cybersickness). [53], [54]

Typickým příkladem motion sickness je případ, když cestujících v pohybujícím se vozidle, přílišně upoutává svoji pozornost a zrak telefonu, knížce, mapě apod. Vizuelní informace o pohybu nejsou registrovány člověkem, který ovšem v pohybu skutečně je, a tento pohyb je registrován smysli ostatními. Vytvářejíc konflikt smyslů. [55]

U VR sickness je tomu naopak. VR sickness a motion sickness prokazují podobné symptomy. Jedním z jejich rozdílů však je, že ve VR je pohyb vizuelně registrován, avšak žádný pohyb ve skutečnosti prováděn není. Opět zde nastává konflikt smyslů. [12]

Mezi symptomy motion sickness se řadí únava, problémy s koncentrací až zmatení, bolest hlavy, závratě, pocení, zrychlené dýchání, žaludeční nevolnost až zvracení. [53], [54]

Závažnost a náchylnost na motion sickness závisí na faktorech jako druh a síla vykonávaného/pozorovaného pohybu. Na individuálních biologických predispozicích člověka (věk, pohlaví, zdravotní stav atd.). Tak také na jejich předešlé zkušenosti a adaptaci na motion sickness. Praktika, která se ukazuje jako jeden z nejefektivnějších způsobů, jak se s motion sickness vypořádat. [54], [55]

Motion sickness si lze představit jako nadmnožinu všech ostatních typů „sickness“ o kterých je v této diplomové práci hovořeno.

## Cybersickness

Definice cybersickness, převzatá od Frontiers zní následovně:

*„Cybersickness je forma motion sickness která nastává jakožto výsledek vystavení se imerzním prostředím extended reality (XR), jako aplikace virtuální reality (VR) a augmentované reality (AR).“ [51]*

Cybersickness lze vyjádřit jako podmnožinu motion sickness, a nadmnožinu VR sickness a simulator sickness. Mezi její prvky lze zařadit také i jiné technologie jako například obrazovky nebo monitory, které dovedou evokovat stav podobný motion sickness. [13]

Cybersickness jakožto druh motion sickness, je taky někdy označován jako visually induced motion sickness (VIMS). [16]

Sdílí tedy mnohé, nikoliv však všechny její charakteristiky. [10], [12]

Odlišuje se primárně tím, že za stav nevolnosti nemůže prezence skutečného pohybu (motion), nýbrž iluze vlastního samovolného pohybu, který však není ve skutečnosti prováděn (vection). [6]

Typické symptomy cybersickness tvoří z největší části pocit nevolnosti, dezorientace posturální nestabilita nebo vertigo, zmatení, bolest hlavy nebo očí a rozmazané vidění. [6], [10], [12], [52]

## Simulator Sickness

*„Simulator sickness je syndrom podobný motion sickness, často prožívaný v simulátoru nebo v jiné virtuální realitě (VR).“ [52]*

Simulator sickness je tedy kategorizován jako podmnožina motion sickness a cybersickness, a zároveň nadmnožina VR sickness. [10]

Simulator sickness může nastat v jedincích po určité době nebo činnostech v různých druzích simulátorů nebo тренаžerů.

Simulator sickness se řadí do své vlastní kategorie, jejíž výzkum byl vázán převážně na letecké simulátory, V závislosti na technologickém provedení a autentičnosti simulátoru, v zařízení může nastat skutečný pohyb (motion), tak zároveň i jeho iluze (vection). [10]

Podobně jako u motion sickness a cybersickness, I zde panují zděděné symptomy jako únava, obecná nebo žaludeční nevolnost, bolest hlavy nebo očí, problémy s koncentrací, rozmazané vidění, závratě nebo vertigo, zrychlené dýchání. [6], [10], [12] [52]

Po vzoru motion sickness a cybersickness, náchylnost na simulator sickness má podobné faktory jako individuální biologické predispozice, předešlá zkušenost/zvyk, nebo závažnost a typ stimulace. [52]

Lze se domnívat, že studií faktorů a korelací mezi simulator sickness, motion sickness, a VR sickness může poskytnout značné informace pro nalezení řešení VR sickness.

## VR Sickness

### Definice VR sickness

*„VR sickness poukazuje na pocit podobný motion sickness, jenž nastal během VR zážitku.“ [3]*

VR sickness představuje podtyp cybersickness, která byla vyvolána specificky VR technologií jako například CAVE nebo HMD headsetem. [3]

Podstata současných VR systémů spočívá v umožnění pohybu jedince ve virtuálním prostoru, s relativně malou potřebou pohybu skutečného. Pohybu ve virtuálním prostředí je dosaženo relativně malými pohyby těla, převážně však skrze teleportování z místa na místo, nebo pomocí tlačítek a analogových joysticků na ovladači. Lze tedy předpokládat, že primárním činitelem stavu nevolnosti zde není pohyb (motion), nýbrž iluze pohybu (vection).

Jednotlivé symptomy VR sickness se mohou projevit u člověka ve formě únavy, rozmazaného vidění, bolesti hlavy, těžkostí od žaludku a zrychleného dýchání. Které se mohou ve finále eskalovat až k silné nevolnosti, dezorientace či vertigo a zvracení. [4], [6], [10], [11], [12]

Dominantním symptomem je zde dezorientace a problémy s motorikou, která až poté může být následována pocity nevolnosti, těžkostí od žaludku nebo zvracení, a až v poslední řadě symptomy spojené s narušením zraku nebo očí. [51]

I zde panují faktory spojené s nadřazenými kategoriemi “sickness”, které budou pro obecnost shrnuty jako: zdravý a biologické predispozice, užívaná VR technologie, design VR prostředí, čas a zkušenosti s VR a motion sickness.

Populární metodikou měření a zaznamenávání VR sickness a cybersickness je formou tzv. “Simulator sickness questionnaire”. Formulář pro zaznamenávání subjektivních výpovědí subjektů, kteří podstoupili VR zážitek, a z jejichž odpovědí je vypočítáváno skóre indikující závažnost cybersickness. [16]

Předěšlé studie a měření ohledně tematiky cybersickness a VR sickness však odhalily další projevy které je možno objektivně měřit, a jak v reálném čase zaznamenávat postup VR sickness v jedinci jako srdeční tep, hladiny kortizolu, rozšířené zorničky, nebo elektrodermální aktivita. [5], [6], [10], [12]

## 2.2 Faktory ovlivňující VR sickness

Předešlá měření, průzkumy, analýzy i meta-analýzy realizované vzdělávacími, vědeckými, a soukromými institucemi se již v minulosti snažily o nalezení jednotlivých proměnných a faktorů, které figurují v otázce cybersickness a VR sickness. Faktorů je skutečně mnoho a skládají se jak z individuálních, technologických a jiných složek. [10], [11]

### 2.2.1 Aktuální zdravotní stav a biologické predispozice

#### Zdravý

Předešlé studie poukázali na zvýšenou citlivost na výše zmíněné druhy sickness, pokud má jedinec již historii s náchylností na motion sickness/kinetózu. [3]

Nadále je možné že náchylnost a závažnost je větší, pokud zdravotní stav jedince není zcela v pořádku, vlivem například žaludečních křečí, horečky, kocoviny, bolesti hlavy, únavy, problémů s dýcháním, a jiné běžné nemoci. Obecně se jedná o zhoršený fyzický stav. [12]

#### Věk

Studie se do dnešního dne nemohou plnohodnotně shodnout jaký vliv má cybersickness nebo VR sickness u rozdílných věkových kategorií. U některých studií, lidé s vyšším věkem prokázali vyšší SSQ skóre, a někdy zase ti mladší. Ukazuje se, že mnohé studie si protirečí v otázce věku. [12]

Meta-analýza předešlých studií z roku 2021, udává že důvodem může být to, že u starších jedinců lze očekávat zhoršení motoriky, zatímco u mladistvých jedinců zase nelze očekávat dostatečně vyvinutou motoriku. Nadále také že doposud nebylo provedeno dostatek měření na značně věkově diverzní skupině jedinců, která by prokázala značný rozdíl. [4]

Otázka věku tudíž doposud zůstává v říši spekulací, avšak je konstantně poukazováno na její důležitost.

#### Pohlaví

Předešlé studie na toto téma nedokázali zcela jednoznačně prokázat, že rozdíl v pohlaví má značný dopad na VR sickness. Meta analýza této problematiky však sumarizuje že zhruba 56.5% ze 46 studií konstatují že, ženy vykazují silnější náchylnost na VR sickness. [4], [5]

Další studie poukazují na faktor periferní vize a zorného pole (FOV) ovlivněné tvarem lebky, a jinými hormonálními či vývojovými rozdíly mezi muži a ženami. Poukazováno je například na šířku zorného pole/periferní vize, která bývá větší u žen než u mužů. Tudíž u žen může tímto figurovat vyšší náchylnost na motion sickness a VR sickness. [4], [15]

Některé studie uvádí, že ženy vykazují slabší posturální stabilitu oproti mužům. [3]

Lze z těchto zjištění usoudit že faktor pohlaví ve sféře VR sickness je stále ještě rozebírán. Avšak více vědeckých článků se přiklání k názoru, že pohlaví při VR sickness roli skutečně hraje, a že ženy se ukazují jako více náchylné na VR sickness.

#### Náchylnost na Motion Sickness

Vzhledem k tomu že VR sickness a cybersickness jsou pouze podtypem motion sickness, sdílí tak většinu svých charakteristik. [6], [10], [12], [52]

Náchylnost na motion sickness, má šanci se promítnout i ve VR. Lidé, kteří jsou náchylnější na motion sickness, prokazují zvýšené nepohodlí ve VR, a snáz se u nich vyskytne VR sickness. [4]



### 2.2.2 Užívaná VR technologie

K faktorům, které figurují u VR sickness přispívá více než samotná podstata člověka, ale také technologie, na kterém je VR systém založen. U současně populárních VR HMD, se nejčastěji hovoří a pracuje s následující technickými specifikacemi:

#### **Stereoskopie**

Stereoskopický typ displeje v současných VR HMD systémech vykazuje vyšší hodnoty SSQ než systém typu CAVE. [4]

Stereoskopie je využíváno v obou těchto VR technologiích, a je pravděpodobné že tato technologie může být sama o sobě méně vhodná v porovnání s klasickými obrazovkami. [15], [16]

Existuje jev zvaný “Vergence–accommodation conflict“ (VAC), který ve stereoskopických technologiích představuje neshodu mezi vzdáleností pozorovaného objektu a zaostřovací vzdáleností. VAC má dopad na námahu očí a VR sickness. [15]

Monoskopické obrazovky nekladou tak závažné problémy se cybersickness, a bylo by tudíž vhodné pro technologii, aby se, pokud možno ujala směrem monoskopických obrazovek pro zmírnění VR sickness. Ačkoliv monoskopické obrazovky neposkytují natolik silný pocit imerze, v porovnání se stereoskopickými obrazovkami. [4], [5]

#### **FOV**

Současné studie se shodují na praktice zužování zorného pole. Jak na hardwarové, tak na softwarové úrovni. Výsledkem čehož se sníží symptom VR sickness a dojde ke zvýšení celkové pohody při navigaci ve VR prostředí. Musí se ovšem dbát na to, že příliš úzké FOV nenabudí až tak silnou imerzi. [4], [12], [16], [34]

Problémy mohou také být již i v samotné podstatě toho, že obrazovka v HMD je velice blízko očí, a je zde nutno upravit obraz za pomoci čoček. Vzdálenost mezi obrazovkou a očima zůstává stejná, avšak hloubka VR prostředí, a jednotlivé vzdálenosti v ní ne. Vytvářejíc konflikt mezi skutečným FOV a virtuálním FOV. Tento konflikt přispívá k VR sickness. [15]

#### **Latence/Lag**

Udávaná v ms (microseconds)

Technologie nemusí být vždy dostatečně rychlá, aby dokázala zpracovat pohyb člověka ve VR, a vrátit mu vizuální informaci o jejich vykonaném pohybu. Zpoždění mezi vstupní a výstupní akcí. Cybersickness tedy má zvýšené riziko, pokud jsou prezenční časté výkyvy v latenci. [4], [10], [15], [16], [34]

Ukazuje se však, že snížená latence po dlouhou dobu nevyústí v horší cybersickness, jelikož na konstantní sníženou latenci si jedinec zvykne, a začne opoždění očekávat. [4]

#### **Flickering**

Více studií tvrdí že flickering obrazovky, pozorovatelné změny/výpadky obrazu nebo záblesky, a nekonstantní úrovně jasnosti, způsobuje cybersickness a může nezdravě škodit očím. Tento problém řeší nastavení vyšší obnovovací frekvence a dosažení vyšších FPS. [10], [12], [16]

Plynulý obraz pomáhá předejít jevům jako flickering. V dnešní době jsou však VR HMD dostatečně technicky vyspělé, aby se tomuto úkazu typicky předešlo [4].

## **Optical flow a Iluze vlastního pohybu**

Statický obraz neevokuje tak silný pocit nevolnosti jako pohybující se obraz. Rychlost ve VR scéně je spojena s vyšším rizikem VR sickness. Tento efekt je pozorován a nejvíce silný při méně patrných rychlostech ve VR prostředí. Při vyšších hodnotách člověk již rozezná tento pohyb snáz, a dokáže své očekávání lépe přizpůsobit. [4], [7].

Jako když auto velice pomalu jede, ale ne dostatečně rychle aby bylo vnímáno jako pohybující. Člověk má spíše pocit, že se musel pohnout on sám, nebo že takto toto auto stálo vždycky.

Nadále lze tuto problematiku poukázat na scénáři, kdy se nepatrně ve VR scéně pohybují předměty, avšak VR uživatel stojí pevně na místě. Vytvářejíc tak iluzi vlastního pohybu (vection), následovaným konfliktem smyslů. Tento úkaz je označován jako “vection” a je jedním z příčin virtually induced motion sickness (VIMS). [9]

Tyto závěry jsou však nedostatečně prokazatelné, jelikož názory studií se liší. [4], [7], [9]

## **6 DOF (Six Degrees of Freedom)**

Podstatou VR technologií je dát nový rozměr a možnosti interakce s virtuálním světem. Člověk má novou dimenzi svobody a kontroly. Tato svoboda si ovšem vybírá svou daň, jelikož čím více os pohybu či rotace, tím vyšší je riziko VR sickness. [4], [5], [12], [52]

Lze tedy očekávat že se jedinec ve VR vystavuje většímu riziku VR sickness, pokud má absolutní svobodu pohybu a rotace ve 3D prostoru, jako například pokud by létal prostorem jako astronaut. Oproti tomu člověk s omezenou svobodou pohybu, jako například možnost pouze rozhlížení, chování, a omezení vertikálního pohybu pouze na skákání za pomoci gravitace, by takovému riziku vystaven nebyl.

## **Váha VR zařízení**

Nepohodlný nebo příliš těžký VR headset neprokazuje, že by hrál roli při VR sickness, ačkoliv vyšší váha je doprovázena s větším pocitem nepohodlí [4].

Je tedy vhodné váhu VR headset co nejvíce minimalizovat a rovnoměrně rozdělit váhu HMD po celé ploše hlavy.

## **Kontrola**

Zajímavým jevem představuje koncept kontroly ve VR. Ukazuje se totiž že pasivním sledováním pohyblivé scény, bez možnosti jakékoliv kontroly ze strany uživatele, má silnou korelaci s VR sickness. To samé platí i v případě, pokud je kontrola náhle člověku odebrána. Naopak možnost kontroly nad VR prostředím, umožňuje individuální přístup, a určení tempa pro daného člověka ve VR. Snižujíc tak šanci výskytu VR sickness. [4], [8], [12]

Příkladem zde může být uvedena simulace horské dráhy, kterou z pohledu první osoby sleduje jedinec ve VR. Absence kontroly, a rychle pohybující se prostředí může vyvolat VR sickness. Naopak vlastní pohyb, jako například chůze, lze kontrolovat a uzpůsobit jí vlastním potřebám.



### 2.2.3 Virtuální prostředí a navigace

#### Realističnost

Realističtější prostředí VR scény či grafické zpracování se neukazuje jako přímý faktor pro VR sickness. Ačkoliv studie tvrdí že realističtější prostředí mají větší tendenci stimulovat cybersickness v porovnání s abstraktnějším/stylizovanějším designem VR prostředí. [34]

Nadále větší realismus přichází s větším očekáváním realistického chování/pravidel, a očekávání doprovázení vestibulární informace, vizuální informací. Porušením této rovnováhy mezi vizuální a vestibulární percepcí ve VR, může vést k pocitům nepohodlí nebo nevolnosti. [4], [5]

#### Navigace a pohyb

Kvůli limitacím prostoru ve skutečnosti, se musí pohybu na velké vzdálenosti ve VR, docílit jiným způsobem než pouhým pohybem člověka. Častými metodami přemístování po VR světě jsou teleportace, nebo chození za pomoci ovladače nebo joysticku. Teleportace, a podobné náhlé pohyby založené na podobném principu, mohou ve VR býti doprovázeny dezorientací. Na druhou stranu chození může evokovat nevolnost. [34]

V této sekci lze připomenout problém s percepcí samovolného pohybu (vection), přesto že skutečný pohyb nebyl proveden. Lidé preferují provádět pohyby ve VR očekávaným, a co nejpřirozenějším způsobem jako ve skutečnosti. [34]

Důmyslným a intuitivním designem interakce a pohybu ve VR, by se tudíž dal risk VR sickness redukovat.

#### Vícesmyslová stimulace

Studie naznačují, že inkluze ostatních smyslů společně se zrakem, jako sluch, čich, hmat, nejenom že zvyšují imerzi daného VR prostředí, ale také snižují VR sickness. Pouhá vizuální informace naopak VR sickness zvyšuje. [4]

Jiné studie dokonce tvrdí že klidná nebo radostná hudba přispívá k mitigování cybersickness. [6], [34]

#### Rest frame

Tato praktika se pro názornost dá také nazvat: „referenční bod“ nebo „frame of reference“.

Rest frame znamená že v prostoru existuje jistý objekt, na který se lidské oko “přichytí”. Od tohoto objektu se veškerý okolí pohyb vnímá jako relativní vůči právě tomuto objektu. Většinou rest frame je realizován formou pozadí. Typickým příkladem mohou být velké statické objekty jako pohoří nebo budova. Pokud se něco v prostoru s tímto referenčním objektem hýbe, například člověk, lidské oči kalkulují pohyb tohoto člověka v daném prostoru relativně, vůči zvolenému referenčnímu objektu. Když ve scéně není žádný rest frame, kterého se oči mohou “chytyt”, může to vést ke smyslovému konfliktu, a vyústit až v cybersickness. [12], [20]

## 2.2.4 Čas a zkušenost

### Čas

Korelace mezi časem ve VR a výsledné SSQ skóre je prokazatelná z předešlých studií. Čím delší je nepřetržitý čas strávený ve VR, tím větší riziko a závažnost VR sickness. Strávený čas ve VR i po dobu menší než 10 minut stačí k vyvolání VR sickness. Záleží opět na stavbě člověka a jiných faktorech. [4], [12]

Je obecně doporučované, aby jednotlivé instance ponoření se do virtuálního světa skrz VR byli limitované na kratší intervaly s přestávkami. [8]

### Zkušenost

Předešlá zkušenost s virtuálním prostředím nebo VR samotným, hraje podstatnou roli ve VR sickness. Ti, co již s navigací ve VR v minulosti již seznámily, prokazují menší SSQ score jsou lépe přizpůsobení na zvládání úloh ve VR. [4], [15]

Adaptace vystavením se motion sickness pomáhá při budoucích motion sickness. [8], [10], [12]

Zkušenost může být také částečně brána jako předešlé zkušenosti s řízením aut nebo s hraním počítačových her. Hráči počítačových her prokázali vyšší odolnost vůči cybersickness. Zkušenosti s hraním počítačových her mohou tím pádem snížit intenzitu a náchylnost jedince na cybersickness/VR sickness. [6], [12]

### 3 Analýza současného stavu a dosavadních zjištění

V této sekci je pojednáváno o aktuálním pochopení a uplatněných praktikách v rámci problematiky VR sickness. Od technologického provedení VR a principu jeho funkčnosti. Přes design VR prostředí. Až po způsoby, jak VR sickness měřit, a jeho účinky mitigovat. Cílem je nalézt jaká zjištění a praktiky již existují, a jaké mají dopady na VR sickness.

#### 3.1 Design VR systémů a technologie

##### Zobrazování

Stereoskopická technologie zůstává stále primárním zobrazovacím způsobem v HMD systémech, a představuje jeden z možných činitelů VR sickness. [4], [5], [15]

Videoherní konzole Nintendo Virtual boy z roku 1995 využila podobného principu jako dalekohledy, aby umožnila změnit zaostření jednotlivých čoček pomocí hardwarového posuvníku, lokalizovaném na vrcholu vizoru konzole. Byl užíván pro upravování zaostření nebo rozostření podle očí individuálního hráče, a kontrolu nad motion sickness. Ačkoliv se nejednalo o VR headset, ale spíše o přenosnou konzoli schopnou zobrazovat stereoskopickou 3D grafiku, lze nalézt inspiraci z tohoto konceptu v moderních HMD.

V současné době je využíváno dominantně Fresnelových čoček v HMD systémech. [31]

Jednotlivé čočky lze upravovat po vzoru dalekohledu nebo zmíněné konzole Virtual boy, pro docílení pohodlnějšího a lepšího obrazu pro individuálního nositele, v závislosti na jejich IPD (Inter-pupillary distance). Současní výrobci HMD využívají manuálních prostředků pro úpravu čoček, například v podobě HW otočného knoflíku nebo tlačítka na povrchu VR headsetu (HTC Vive, Valve index). Nebo umožňují hýbat s čočkami přímo uvnitř brýlí (Meta Quest). Existují však i HMD, které dovedou nastavit IPD automaticky (Varjo Aero, Simula One). [32]

Manipulace s čočkami je také možno docílit i z hlediska jejich vzdálenosti od očí, nýbrž i tato proměnná figuruje při VR sickness. [15]

Společně s možností nastavování IPD a vzdálenosti čoček od oka uživatele, zde figuruje i element FOV. Field of view je ve většině moderních HMD do určité míry upravitelné jak na hardware, tak na software úrovni. Výrobci se snaží o co nejautentičtější zážitek ve svých HMD systémech tím, že se snaží o co nejvyšší FOV, které bude srovnatelné s limity skutečných lidských očí. [32]

Příliš široké zorné pole však přispívá k riziku výskytu VR sickness. [4], [12], [34]

Z tohoto důvodu se v mnoha případech setkáme spíše s HMD systémy, které se nesnaží nutně překonat konkurenci v možnostech FOV své VR konzole. Nýbrž se snaží najít takovou hodnotu FOV, aby byla nalezena rovnováha mezi imerzí ve VR, a redukcí VR sickness. [32]

Latence a FPS jsou důležitým faktorem při VR sickness. [4], [10], [12], [15], [34]

S těmito problémy již moderní technologie dokázali udělat pokrok. Mnohé VR HMD jsou v současné době již opatřeny kvalitními vysokofrekvenčními displeji. Standalone VR HMD disponují dostatečným výpočetním výkonem, pro zajištění plynulého obrazu. Pokud se jedná o VR HMD typu tethered, jsou doprovázeny doporučenými specifikacemi pro počítač, ke kterému musí být HMD připojeno. [32]

Vykreslovací vzdálenost představuje, do jaké vzdálenosti bude generován virtuální obsah. V jakém množství a jaké kvalitě. Pokud veškerý obraz a objekty jsou i na velké vzdálenosti velmi ostré, mohou vydávat falešné informace o skutečné vzdálenosti. S tímto se již dá v mnoha VR i počítačových aplikacích manipulovat, možností úpravy vzdálenosti vykreslování. Lze s přibývajícím vzdáleností také využít nastavení depth of field (DOF), které zbytečně vzdálené objekty vizuálně rozmaže, dokud nebude objekt dostatečně blízko. [34]

### 3.2 Navigace a design ve VR prostředí

Balakrishnan aj. (2020) tvrdí, že v souladu s chápáním lidské psychologie, je během designu VR prostředí nutno soustředit na prvky uvěřitelnosti, interaktivity, prozkoumatelnosti a imerze. [29]

Kromě těchto spíše obecných praktik zde máme i specifitější názory na design VR prostředí.

#### Rest frame

VR scéna/svět obsahuje většinou objekty. Nehybné, pohyblivé, malé, velké, v popředí, v pozadí atd. VR scény jsou strukturované, aby i přes jejich někdy abstraktní až chaotické pasáže, měli v sobě řád, a pomohli tak uživateli s orientací ve VR prostoru. Scéna může mít pozadí, vyobrazující objekt, například statického pohoří, od kterého se bude uživatel orientovat. Tento statický objekt slouží jako bod, od kterého lze určit relativní pozici či pohyb uživatele samotného, nebo jiných okolních pohybujících se objektů. Pokud je prostředím uzavřená místnost, může rest frame jiný statický objekt jako stůl, nebo zdi, okna atd. Mnohé VR programy se explicitně nesnaží o co nejchaotičtější zážitek bez rest frame, kde všechny objekty mění tvar, rotaci, lokaci a velikost. Vytvořením prostředí bez rest frame by totiž s velkou pravděpodobností vedlo k VR sickness. [12], [20]

Proto se vývojáři ubírají spíše směrem strukturování VR prostředí realisticky, a přiblížit jeho chování dle očekávání člověka. Dopomáhají tak k menšímu riziku VR sickness. [4], [5], [34]

Důvtipné řešení rest frame se ukazuje prezence tzv. „virtuálního nosu“. Tento pojem můžeme chápat jako prvek uživatelského rozhraní, který je vždy na obrazovce, a který může sloužit jako rest frame pro člověka i v prostředí kde rest frame neexistuje. Může být pojat jako skutečný model lidského nosu, který je nepatrně vidět na obrazovce. Nebo lze virtuální nos pojmout abstraktně pomocí horizontálních a vertikálních čar na obrazovce. Implementace virtuálního nosu prokázala, že tato praktika efektivně pomáhá při redukci VR sickness. [7]

#### Pohyb a Kontrola

VR HMD umožňuje otáčení hlavou nebo celým tělem pro rozhlížení se po virtuálním okolí. Prostorové nároky na tento pohyb jsou malé. Horší je to v případě přemísťování uživatele na velké vzdálenosti. Pro tyto účely je využíváno ovladače pro možnost chůze nebo teleportace ve VR prostředí. Teleportace může způsobit dezorientaci, zatímco chůze může spíše za nevolnost. Oba tyto typy přemísťování představují svoje vlastní problémy, které mohou vést k VR sickness. [17], [34]

#### 6 DOF

Jak již bylo naznačeno. Čím více nekontrolované svobody pohybu (osy rotace/pohybu) ve VR, tím vyšší riziko výskytu VR sickness. [4], [5], [12], [52]

VR aplikace se proto ve většině případů drží více při zemi v možnostech své navigace a nachází způsoby, jak limitovat pohyb vedoucí k VR sickness. Typickým příkladem je implementace gravitace ve VR světě, která limituje vertikální možnosti pohybu a dodává na realističnosti.

### 3.3 Současné metody měření a prevence VR sickness

VR sickness je možné měřit objektivními, tak subjektivními způsoby. Objektivní metody si zakládají převážně na získávání dat za pomoci měření tělesného stavu člověka během VR sickness. Výsledné hodnoty jsou následně porovnán s normálními klidovými hodnotami naměřených separátně, nebo u jiné kontrolní skupiny.

Subjektivní metody nabývají podoby dotazníků jako například SSQ, kdy je aktuální stav po VR zážitku popsán samotným jedincem tím, že odpovídá na specificky sestavený okruhu otázek.

#### 3.3.1 Metody měření

##### Srdeční tep

Dle měření Korejské university technologie a vzdělání v roce 2022, cybersickness způsobená HMD zařízeními je ve většině případů doprovázena zvýšeným srdečním tepem. Nasazením monitoru srdečního tepu lze tímto způsobem objektivně měřit cybersickness. [5], [12], [16]

Je třeba však brát ohledy na kontext daného VR zážitku, a zdravotním stavu jedince, aby nevznikl omyl. Zvýšený srdeční tep nemusí být vždy důsledkem cybersickness. Prezence zvýšeného srdečního tepu může vést k přitěžím ve VR. [12]

##### Hladiny kortizolu

Kortizol, známý také jako “hormon stresu”, má svůj primární účel mobilizaci organismu při stresové zátěži. Zvyšuje hladinu cukru v krvi, krevní tlak, a zapříčiňuje i změny nálady. [56]

Dle měření provedené Čhonanskou univerzitou v roce 2022, byli po VR měření vykázaný vyšší hladiny kortizolu než před VR zážitkem. [5]

Představujíc další způsob, jakým objektivně měřit VR sickness, a to za pomoci zařízení monitorující hladiny kortizolu.

##### Rozšířené zorničky

KOURTESIS aj. (2023) ve svém výzkumu cybersickness konstatují, že velikost zorniček může sloužit jako bioindikátor cybersickness. Kde dle jejich měření, má intenzita cybersickness, kterou člověk ve VR prožívá, dopad na velikost jejich zorniček, konkrétně v podobě menšího diametru panenek. [6]

##### Elektrodermální aktivita

Známé také jako Galvanic skin response (GSR) nebo electrodermal response. Měření zahrnuje využití senzorů pro zaznamenávání elektrodermální aktivity a konduktivity na různých částech lidského těla, jako prsty nebo čelo. Výsledky studie od Mazloumi aj. (2018), vykazují paralelní průběh GSR hodnot s nástupem nevolnosti. [10], [16]

Jiné studie tohoto přístupu využili také pro měření nervové aktivity. Kde usuzují, že je možné získat informaci o současném mentálním rozpoložení jedince, jako jejich vědomí a pozornost. [12]

V rámci této diplomové práce je realizováno měření, využívající právě GSR senzorů pro objektivní měření VR sickness.

### **Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)**

Simulator Sickness Questionnaire představuje způsob jakým měřit dopady cybersickness na jedince, formou subjektivního sebehodnocení jejich aktuálního stavu ve formě dotazníku. Dotazník je vyplněn po opuštění simulace nebo virtuálního prostředí. Těto praktiky bylo převzato od motion sickness questionnaire (MSQ), ze které byly vybrány veličiny, které jsou aplikovatelné pro měření motion sickness v simulovaném nebo virtuálním prostředí. [16], [59]

Ve své standardní podobě SSQ analyzuje celkem 16 symptomů z původních 28 symptomů MSQ. SSQ rozděluje jednotlivé symptomy na podhodnoty nevolnost (N), okulomotorika (O), a dezorientace (D). [14], [60]

Těchto 16 symptomů, tvoří dotazník o šestnácti otázkách, které jsou ohodnoceny subjektem samotným na čtyřbodové škále od 0 až 3, v závislosti na závažnosti daného symptomu.

Každý symptom má svoji individuální váhu 0 nebo 1 v každé z podhodnot N, O, D. Závisí na tom, zdali tento symptom hraje roli ve dané podhodnotě nebo nikoliv. Symptom může totiž hrát roli v jedné, nebo také ve více těchto podhodnotách najednou. Například váhy symptomu v podobě 1,1,0, znamenají že symptom má roli pouze ve podhodnotách N a D. V tomto případě se subjektem udaná hodnota pro daný symptom, zahrnuje v rámci těchto dvou podhodnot.

Následně se celková hodnota pro každou podhodnotu N, O, D, dosáhne sečtením jednotlivých hodnot ze symptomů, které v této podhodnotě hrají roli. Tato hodnota je poté násobena svojí individuální konstantou (váhou). Váhy jsou určeny předem pro každou podhodnotu zvlášť, pro určení celkové závažnosti dané podhodnoty.

Využíváno je standardních vah  $N = 9.54$ ,  $O = 7.58$ ,  $D = 13.92$ .

Hodnoty jednotlivých podhodnot se mohou na také sečíst, a poté násobit váhou jinou, pro vypočítání jednotného čísla závažnosti cybersickness, známé jako "total score" (TS). Nutno podotknout že při výpočtu TS, je nutno brát sečtené hodnoty jednotlivých složek N, O, D, před tím, než byli násobeny svými individuálními váhami 9.54, 13.92 a 7.58. Tyto "čisté" hodnoty, které nebyli doposud násobeny svými váhami, jsou sečteny, a až poté jsou dohromady vynásobeny váhou 3.94, pro výpočet výsledné hodnoty TS. Tato hodnota snáz indikuje závažnost cybersickness [14], [60].

### **Výpočty podhodnot a TS:**

$$(N) = [1] \times 9.54$$

$$(O) = [2] \times 7.58$$

$$(D) = [3] \times 13.92$$

$$TS = [1] + [2] + [3] \times 3.74$$

**Rozsahy hodnot TS:** [59], [60]

TS < 5 = Zanedbatelné

TS 5–10 = Minimální

TS 10–15 = Značné

TS 15–20 = Znepokojivé

TS > 20 = Zlé

SSQ zůstává stále v dnešní době populární metodou evaluace cybersickness ve virtuální realitě, i přes existenci jiných novějších metod evaluace: [14], [59]

**RSSQ** (Revised simulation sickness questionnaire)

**F-SSQ** (Francouzský překlad 16 symptomů simulation sickness questionnaire)

**CSQ** (Cybersickness Questionnaire)

**VRSQ** (Virtual Reality Sickness Questionnaire)

Důvodem vzniku těchto alternativ SSQ, byla kritika na přílišně komplikovanou strukturu, zastaralost, nedostatky, irelevantní data, nebo špatná struktura SSQ. Vedoucí tyto alternativy SSQ k přidávání, nebo naopak odebrání jednotlivých otázek nebo symptomů. O tom, jaký z druhů SSQ je ten nejlepší jsou doposud vedeny spory. Avšak SSQ zůstává zlatým standardem i přes svoji zastaralost. [14], [59]

V rámci této diplomové práce je užito standardního SSQ dotazníku, jehož náhled je dostupný v přílohách.

Nadále nutno podotknout, že jsou vedeny spory o správném užití SSQ. Zdali se má dotazník vyplňovat před expozicí VR sickness, a po expozici VR sickness. Nebo pokud stačí vyplnit dotazník až po expozici. Názory na tyto dvě praktiky se liší, a každá strana má své argumenty. Avšak většina studií pracuje stále s metodikou administrace dotazníku až po vystavení VR sickness nebo na konci měření. [88]

Diplomová práce pracuje s metodikou administrace dotazníku SSQ, tak dotazníku NASA TLX, až po expozici VR sickness, a až na samotném konci měření ve VR. Učiněno je tak z důvodu sledování této praktiky jako validní pro účely měření, a z důvodu časového omezení.

### **NASA Task Load Index (TLX)**

NASA Task Load Index představuje subjektivní metodu měření náročnosti úkolu. Tento dotazník, již od svého vzniku v roce 1986, je celosvětovým zlatým standardem. Využíván může být pro účely měření zátěže například v laboratoři, pilotů nebo obsluhy kontrolních stanic. Je také využíván pro monitorování práce nebo simulací. NASA TLX zachycuje celkem 6 faktorů zátěže, kterým je jedinec vystaven v rámci výkonu své činnosti a plnění úkolu. [77]

Jsou jimi:

- Fyzická zátěž
- Mentální zátěž
- Časová zátěž
- Výkon
- Náročnost
- Frustrace

Zaznamenávání údajů může být prováděno již během samotného úkolu, nebo až po jeho ukončení. Jedinec dle svých subjektivních pocitů a přesvědčení zhodnotí svůj stav a pocity, které v nich daná zkušenost vyvolala. [77], [78]

Je zapotřebí určit závažnost dopadu dané zátěže a její váhu. Jednotlivé faktory jsou podle výpovědí jedince ohodnocovány na škále od 0 do 20, reprezentované čarou s oddíly. Každá čára reprezentuje hodnotu, nikoliv prázdné místo mezi nimi. Tudíž je možno zvolit/zakroužkovat 21 možných hodnot/čárek. [77], [78]

Váhy jsou určeny tím že, subjekt je prezentován sérií patnácti otázek, ve kterých jsou jim představeny vždy právě dva faktory, ze kterých si vyberu ten faktor, který pro ně představoval větší zátěž oproti tomu druhému. Tyto porovnávací otázky, složené kombinováním jednotlivých šesti faktorů mezi sebou bez opakování, vytvoří tedy celkem 15 otázek, ze kterých se utvoří váhy. Váhy svými hodnotami poté reprezentují jasný odstupňovaný obraz toho, jak měli jednotlivé faktory dopad na jedince od největší po nejmenší. Závěrečné vyhodnocování probíhá násobením udaných hodnot u jednotlivých faktorů jejich váhami. [77], [78]

Měření prováděné v rámci této diplomové práce není prováděné za žádným konkrétním účelem, a nepřirazuje žádnému z faktorů větší důležitost nad druhům. Z tohoto důvodu není potřeba hledět na sestavování vah v rámci NASA TLX dotazníku. Tudíž je část sestavování vah přeskočena, a jednotlivé faktory NASA TLX dotazníku budou v rámci měření pracovat se stejnými vahami.



### 3.3.2 Prevence a léčba

Postupná aklimatizace na motion sickness nebo VR sickness vystavováním se jejich účinkům, nebo samotná zkušenost ve VR prostředí, přispívá v budoucí odolnosti proti VR sickness. Jeví se tak jako neefektivnější způsob pro mitigování VR sickness. [10], [34]

Je nutné stanovit a designovat úseky ve VR přijatelné délky, prokládané přestávkami pro minimalizování VR sickness. [4], [34]

Jsou doporučováni zraková a motorická cvičení před použitím VR. [34]

Technologie, design a prvky VR prostředí, přímo určené pro mitigování VR sickness:

- Výkonný hardware VR systému [4], [10], [12], [15], [32], [34]
- Nestereoskopické obrazovky [4], [5], [15]
- Nastavitelné FOV, IPD, depth of field (DOF) a vykreslovací vzdálenost [4], [12], [15], [16], [34]
- Limitace v rámci 6DOF [4], [5], [12], [52]
- Vizuální informace doprovázená vícesmyslovou stimulací [4], [6], [34]
- Adekvátní způsob navigace ve VR prostředí [34]
- Rest frame [4], [7], [5], [12], [20], [34]
- Virtuální nos [7]
- Možnost kontroly ve VR prostředí [4], [8], [12]
- Realističnost a předvídatelnost chování VR prostředí [4], [5], [34]

VR sickness je úzce spojeno se cybersickness a motion sickness, lze tedy aplikovat podobné prostředky pro prevenci a léčbu jejich symptomů. [6], [10], [12], [55]

Pokud jedinec již aktivně prožívá VR sickness, je doporučeno, aby opustily prostředí virtuální reality. VR sickness a její symptomy by po vzoru motion sickness, měli časem sami od sebe odeznít. Pokud jsou symptomy zvláště silné, lze k podpoře zotavení zaujmout pohodlnou odpočinkovou pozici, zajistit přístup čerstvého vzduchu, a doplnění tekutin v podobě vody nebo čaje. V akutnějších případech je možnost použít léky proti cestovní nemoci jako Kinedryl, H1 - antihystamin nebo Skopolamin. [55], [57]

Doba odeznění VR sickness je proměnlivá, a může trvat v rozmezí od několika minut až po několik hodin. Zrakový systém a vestibulární systém člověka se musí opět srovnat. Krátké deseti až patnácti minutové pauzy za každou hodinu strávenou ve VR, prokázali svou účinnost v předešlých studiích. [58]

## 4 Měření VR sickness ve virtuální realitě

Diplomová práce kromě shromažďování potřebné teorie a současných poznatků na poli VR technologií a VR sickness, také realizuje měření efektu VR sickness na člověka. Měření má za úkol ověření dosavadních zjištění týkajících se tohoto úkazu, a nalezení možných řešení pro efektivní mitigaci VR sickness. Je zkoumáno, jaký efekt má VR sickness na jasnost instrukcí, výkon, výsledky plnění úkolu a uživatelskou pohodu ve VR.

Za pomoci VR headsetu Meta Quest 2, standardní a modifikované VR montážní aplikace, GSR senzorů s programem CAPTIV, a dotazníků SSQ a NASA TLX, byla získávána data potřebná pro tento úkol.

Jednotlivé vyjmenované položky figurující v tomto měření jsou popsány v rámci této kapitoly, Dotazníky SSQ a NASA TLX, byly zmíněny v kapitole předešlé. Náhled dotazníků je k dispozici v přílohách.

### 4.1 Vstupní dotazník

Prvním krokem měření je vyplnění vstupního dotazníku měřeným subjektem. Vyplnění dotazníku vyžaduje několik osobních údajů o daném člověku, avšak zachovává jejich anonymitu. Zúčastnění jedinci byli identifikováni na základě přiděleného testovacího čísla. Například „Subjekt 07“.

Vstupní dotazník se primárně opírá o dosavadní relevantní zjištění v rámci teoretické části diplomové práce, kde bylo zkoumáno, jaké faktory primárně určují náchylnost člověka na VR sickness. Dotazník se tedy ptá na otázky zaměřující se na jedincův věk, pohlaví, předešlou zkušenost s VR, průměrný denní čas strávený u videoher, nebo také na náchylnost na kinetózu.

Dodatečně, vybrané subjekty, které vyjádřily svůj souhlas, byli vyfotografováni, a jejich fotografie použity pro zobrazení názornosti průběhu VR měření.

Náhled vstupního dotazníku je společně s ostatními dotazníky k dispozici v přílohách.

## 4.2 VR vybavení a senzory

### VR zařízení, periferie a prostory:

Pro účely měření bylo použito VR HMD Meta Quest 2, na kterém byly zmíněné VR montážní aplikace testovány, a na kterých bylo prováděno samotné měření. Flexibilita a důvtipnost Meta Quest 2 ve svém standalone provedení, vnitřní paměti, dostatečným výpočetním výkonem, a nepotřebou periferních zařízení či neustálého napájení z elektrické sítě, bohatě posloužilo účelům měření.

Do vnitřní paměti VR headsetu byla nahrána standardní tak modifikovaná VR montážní aplikace. Meta Quest 2 posléze umožnil jednotlivé aplikace spustit jako běžnou systémovou aplikaci nebo videohru. Meta Quest 2 je standalone VR HMD, využívající inside-out tracking. Nepotřebuje tudíž senzory pohybu (base stations), nebo být připojeno k PC. Navíc dovede rozeznávat/snímat ruce uživatele, a využívat je jako ovládací prvky. Umožňujíc tak intuitivní způsob ovládání, bez potřeby periferních zařízení nebo ovladačů. Měření tudíž mohlo být prováděno takřka kdekoliv, a s minimálními nároky na VR, periferní zařízení, nebo možnosti okolí. Skutečnost, která se během měření jednotlivých subjektů ukázala jako značná výhoda. S tímto VR headsetem se poté vypravilo za jednotlivými subjekty měření.



Obrázek 4-1: VR HMD – Meta Quest 2 [87]

### **Senzory TEA CAPTIV T-SENS GSR:**

Pro účely měření byly použity Galvanic skin response senzory TEA CAPTIV T-SENS GSR od společnosti TEAERGO. Tyto GSR senzory jsou využívány pro měření stresu, jenž se projevuje změnou elektrických vlastností kůže člověka, zaznamenávané v jednotkách  $\mu\text{S}$  (Microsiemens). Senzory tedy zaznamenávají jednotlivá vzrušení organismu, která se projevují na potních žlázách těla. [79]

Senzory se skládají z několika částí. Jsou jimi uchycující páska na ruku, řídicí jednotka, a dvě elektrody. Každá z elektrod je umístěna na konečky prstů levé ruky člověka. Konkrétně na druhý článek ukazováčku a prostředníčku. Senzory komunikují se softwarem CAPTIV od stejné společnosti TEAERGO, a umožňují tak sledování průběhu hodnot v reálném čase a jejich záznam. Notebook opatřený tímto softwarem je přítomen a aktivní v průběhu měření.

Za pomoci interních nástrojů, kterými disponuje VR HMD Meta Quest 2, je celý proces měření nahráván. Lze tak synchronizovat, identifikovat a zaznamenat díky časové známce body a události, které vyústily ke zvýšeným naměřeným hodnotám. S tímto faktem byli subjekty také obeznámeni, a pod záminkou zachování jejich anonymity, každý podal svůj souhlas s touto skutečností.



**Obrázek 4-2: Senzory TEA CAPTIV T-SENS GSR [79]**

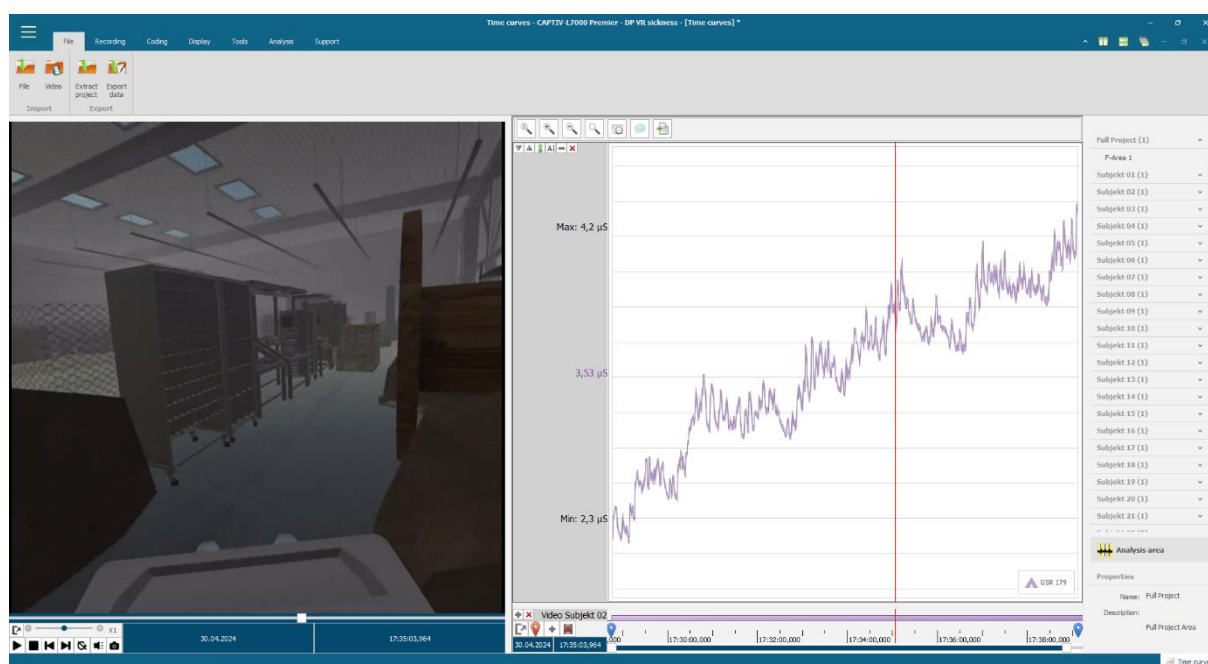
## Software CAPTIV

Hodnoty ze senzorů jsou zaznamenávány a analyzovány za pomoci softwaru CAPTIV od společnosti TEAERGO, který umožňuje kromě synchronního zobrazení také záznam a analýzu více zdrojů dat, pořízených za pomoci nejen GSR senzorů. [80]

Software vyžaduje pro svoje spuštění HW klíč v podobě flash disku, opatřený elektronickou licencí. CAPTIV představuje univerzální platformu pro mnohé senzory od firmy TEAERGO, se kterými komunikuje bezdrátově za pomoci malého vysílače, který se k PC zapojí přes USB kabel. Po zajištění komunikace vysílače se senzorem, je umožněno přistoupit v program CAPTIV na samostatnou kartu měření tohoto detekovaného senzoru. Během celého průběhu měření je možné sledovat snímané veličiny tohoto senzoru, a celý proces je také možno zaznamenávat a uložit pro pozdější analýzu výsledků měření.

Jednotlivé subjekty jsou v rámci programu vedeny pod kódovými názvy jako “Subjekt 07” pro zachování anonymity. Subjekt je osazen GSR senzory, a po odzkoušení správně funkčnosti zařízení, je přistoupeno k samotnému měření a spouštění nahrávací funkce program CAPTIV a VR headsetu současně.

Software nadále umožňuje nahrání jednotlivých záznamů ze senzoru do projektu, tak také i video soubory. Je lze tedy možné porovnávat záznam z VR headsetu s jednotlivými průběhy nasnímaných hodnot za pomoci senzoru, a porovnat je vedle sebe.



Obrázek 4-3: Vzhled aplikace CAPTIV – Porovnání grafu  $\mu\text{S}$  s VR záznamem

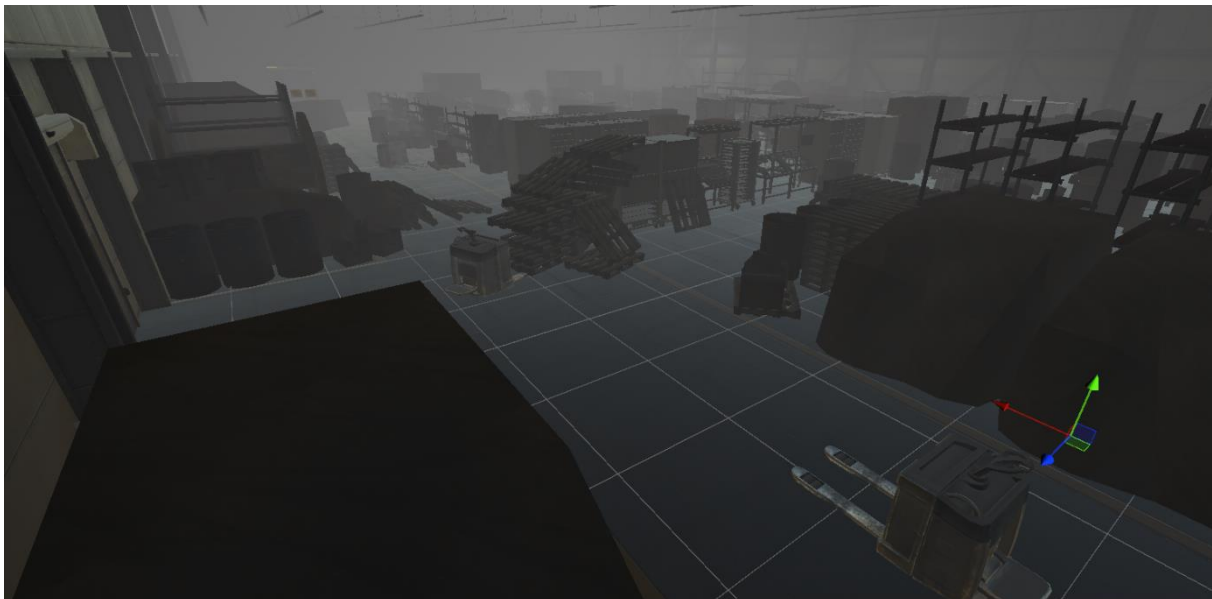
### 4.3 Aplikace pro měření VR sickness

Pro účely měření, byla v rámci diplomové práce poskytnuta VR montážní aplikace vytvořená ve vývojovém prostředí Unity. Konkrétně se jedná o aplikaci pro automobilový průmysl/automotive, ve kterém uživatel má za úkol smontovat dveřní panel auta. Dodaná aplikace byla však dodatečně modifikována pro simulování skutečného prostředí, a vyvolání VR sickness v člověku. Aplikace konkrétně simuluje prostředí výrobní haly, ve které daný subjekt vystupuje ve funkci operátora výroby a řidiče nízkozdvižného akumulátorového vozíku, známém také jako „paleták“ nebo „ještěrka“. V rámci měření tedy figurují dvě VR montážní aplikace. Standardní, a modifikovaná.

Samotné měření ve VR se skládá ze dvou samostatných měření na dvou verzích aplikace. Měření v rámci první verze aplikace obsahuje pouze montážní část, kdy je subjekt postaven na stanoviště operátora výroby. Zde je subjekt za pomoci audiovizuálních instrukcí provázen montážním procesem.

V druhé, modifikované verzi aplikace, je na začátku subjekt posazen do nízkozdvižného vozíku, který před samotným začátkem montáže na stanovišti projede se subjektem prostor výrobní haly. Subjekt nemá nad animovaným strojem kontrolu, a může se tedy pouze rozhlížet, a nechat se vozítkem unášet po virtuální hale, dokud není dopraven na montážní stanoviště.

Samotná hala v modifikované verzi aplikace je rozšířena dodatečnými objekty, pracovišti, a překážkami v cestě. Hala je koncipována do obdélníkového tvaru, s dráhou pro transportní techniku poblíž vnějšího okraje haly, tvořící uzavřený okruh. Výrobní technika, pracoviště, a odkladní prostory jsou lokalizovány uprostřed haly a podél stěn.



Obrázek 4-4: Pohled na halu modifikované verze VR montážní aplikace

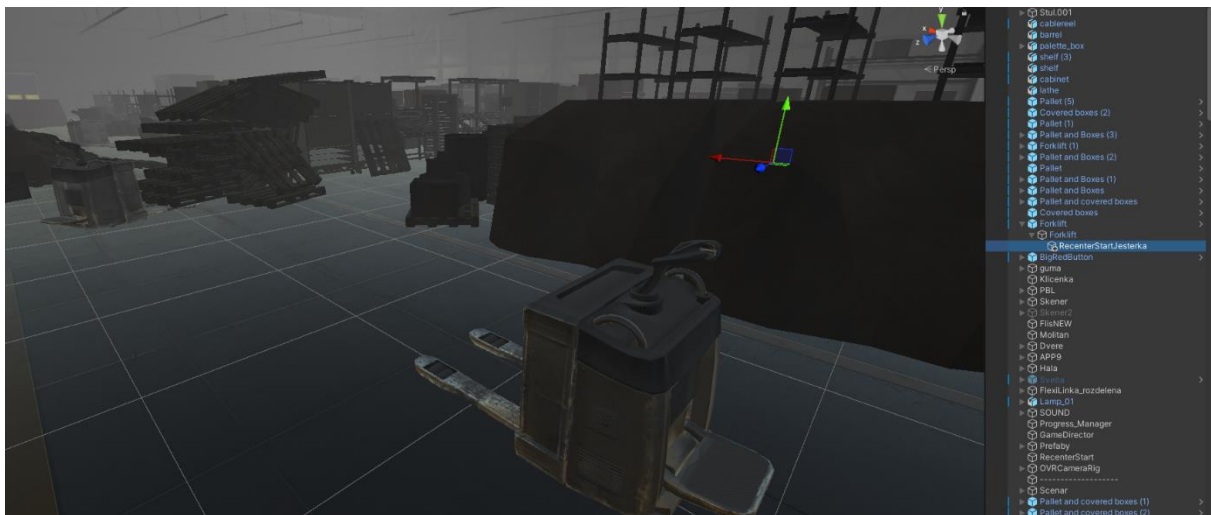


## Vyvolání VR sickness – průjezd halou

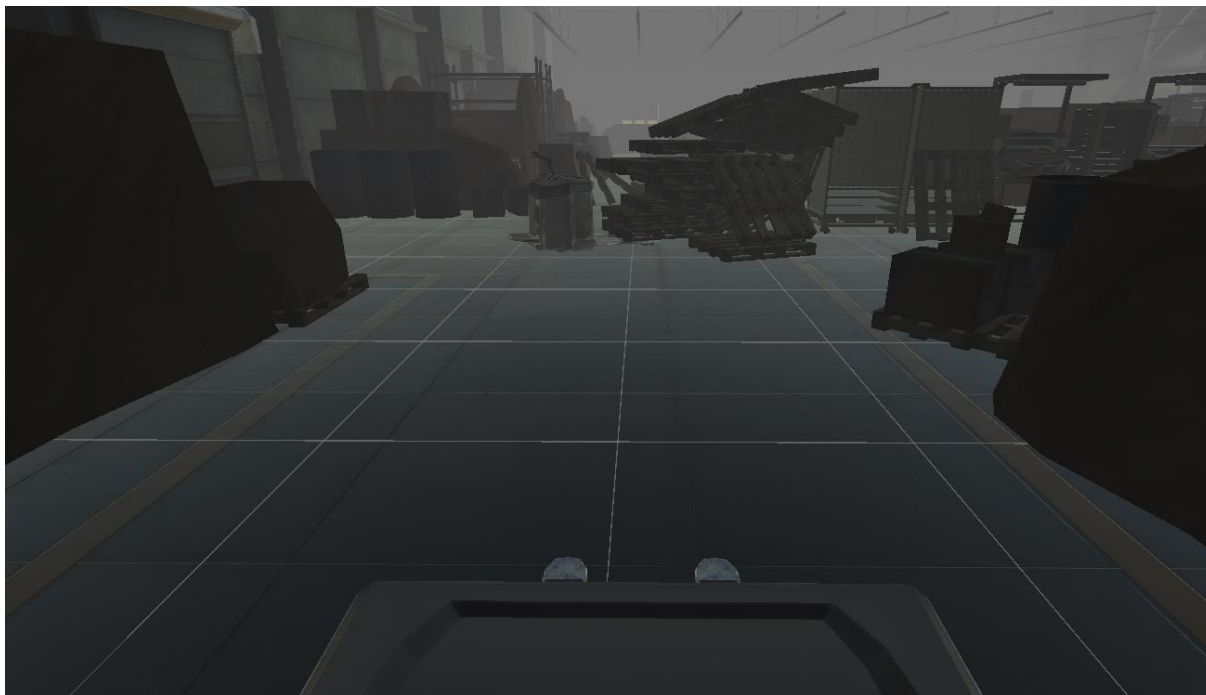
V modifikované verzi aplikace je subjekt před začátkem montáže posazen do nízkozdvížného vozíku, a nekontrolovatelně vypraven po hale. V rámci jízdy navštíví subjekt několik zákoutí a stanovišť v hale. Situace zde nabývá nepořádného scénáře v hale, kdy je potřeba, aby se vozítko vyhnulo překážkám v uličce při své objížděce. Cesta skrz halu je tedy chaotická a neuspořádaná. Je zapotřebí vyhýbat se překážkám v cestě, a nalezení alternativních cest, jak se dostat přes zablokované nebo omezené úseky.

V rámci modifikované verze aplikace byli pro tvorbu rozšířených prostorů výrobní haly použity assety již existující v aplikaci, nebo volně stažitelné objekty z Unity asset store. Samotný asset nízkozdvížného vozíku je umístěn na specifické místo ve výrobní hale, a osazen objektem hráče/uživatele. Následovně byla vytvořena animace pro nízkozdvížný vozík v Unity animátorů za pomoci postupného vytváření jednotlivých klíčových snímků (keyframes), metodou animation blocking. Následná hrubá animace byla vyhlazována dalšími pomocnými klíčovými snímky, umístěné mezi již existující klíčové snímky, do své finální podoby. Na konec animace je přidán spouštěč/trigger, který po dokončení animace umístí uživatele opět na jejich pracovní místo, a spustí originální část montážního procesu. Animace trvá 80 sekund a není ve všech svých etapách plně konzistentní. Tudíž je v některých částech rychlejší a někdy pomalejší, jenž má efekt na rychlost vozíku.

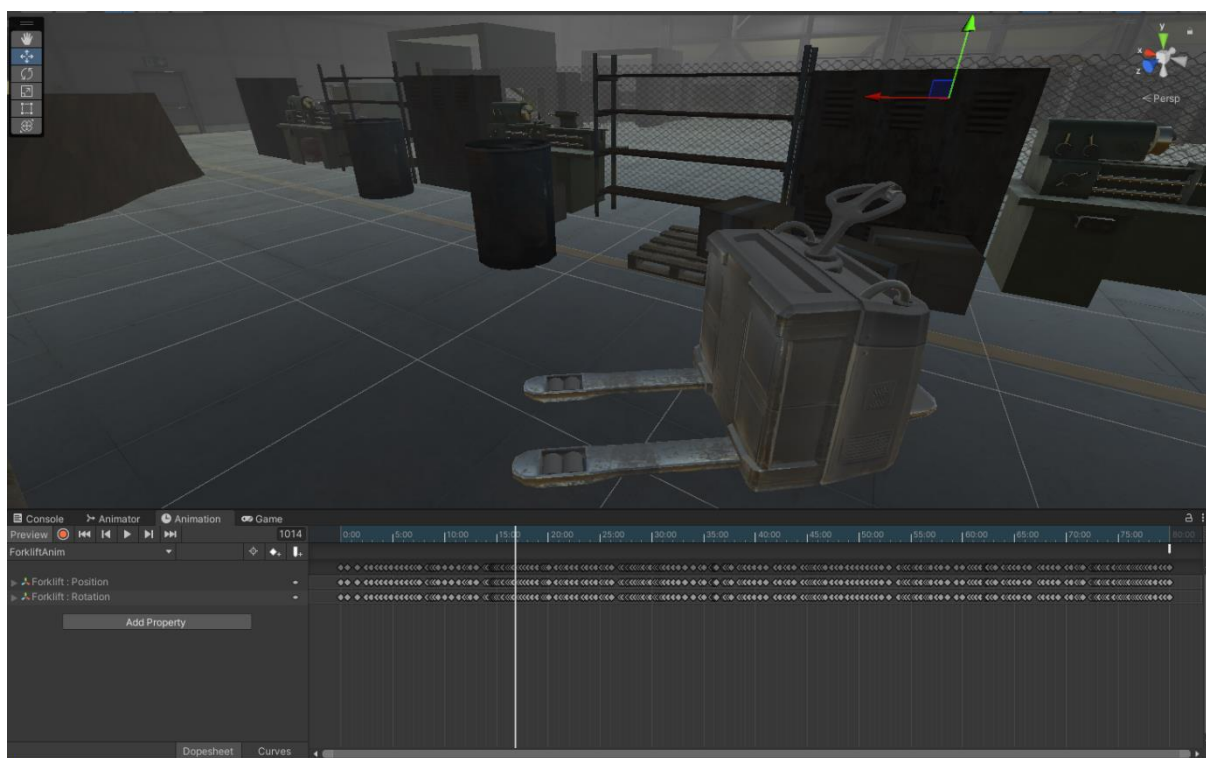
Chaotický stav haly a neuspořádaná jízda je záměrná. Zatáčky, chaotické prostředí, změny v rychlosti, nečekané pohyby a zastávky, nad kterými subjekt nemá kontrolu, jsou zde pro vyvolání VR sickness. Nakonec po navigování a kličkování po montážní hale, je subjekt přivezen před své stanoviště, kde je od nich nyní očekáváno splnit stejný montážní úkol na součásti v roli operátora výroby.



Obrázek 4-5: Objekt uživatele usazen za nízkozdvížné vozítko



Obrázek 4-6: Pohled uživatele při jízdě skrz halu

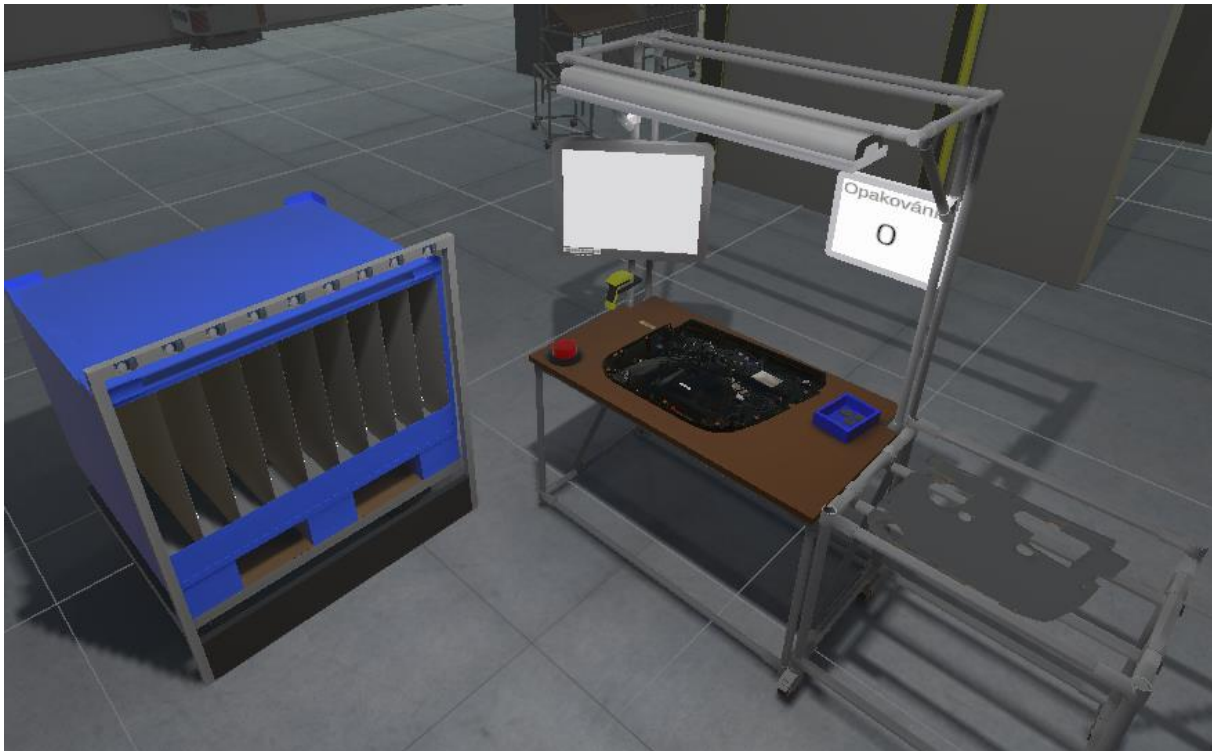


Obrázek 4-7: Časová osa animace nízkozdvížného vozíku



## Montáž:

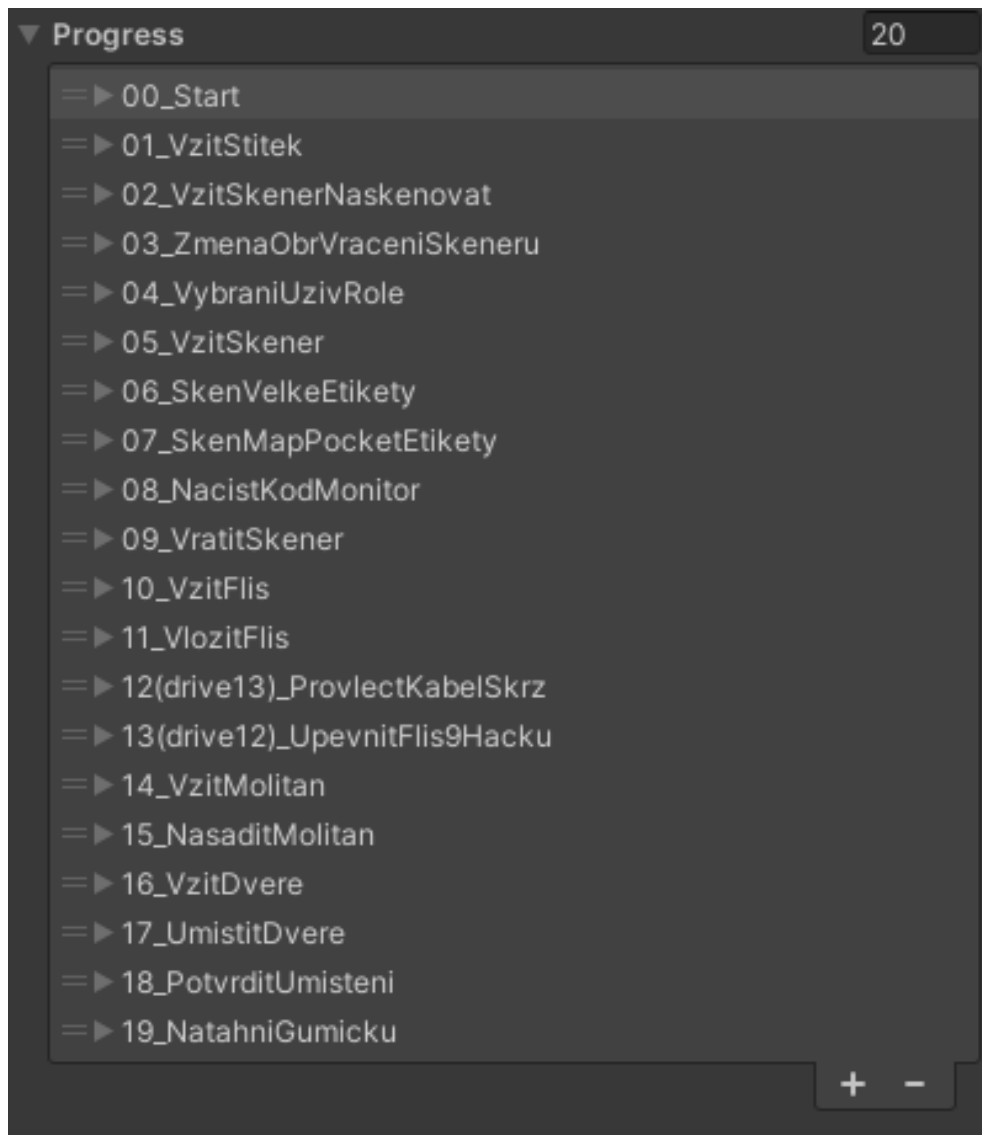
Montáž je základní část aplikace, kterou mají obě její verze společné. V rámci montáže se od uživatele očekává kompletace součástky panelu/desky dveří auta. Montáž je rozdělena do několika kroků. Kroky mají definované pořadí a je proto požadováno dokončení předchozího kroku, než je možno přistoupit ke krok následujícímu. Každý z jednotlivých kroků je doprovázen zvukovou instrukcí a prostorovým ukazatelem (šipka), jak daný krok splnit. Některé z úkolů vyžadují subjekty, aby se otáčeli a prováděli interakci se vzdálenějšími místy a objekty. Některé kroky vyžadují větší přesnost než druhé, nebo použít obě ruce naráz.



Obrázek 4-8: Pohled na montážní stanoviště



Obrázek 4-9: Pohled uživatele na montážním stanovišti



Obrázek 4-10: Přehled jednotlivých kroků montážního procesu

Je očekáváno, že v uživateli může nastat zmatení nad postupem vlivem nejasnosti, nepozornosti, nebo stále trvajících pocitu nevolnosti způsobeným VR sickness. Z toho důvodu je při každém kroku na stole pracoviště přítomno červené tlačítko. Tlačítko po jeho stisknutí přehraje audio instrukce pro splnění aktuálního kroku. Počet stisknutí tohoto tlačítka je zaznamenáván na vedlejším pravém monitoru simulovaného pracoviště. Počet těchto potřeb o zopakování instrukcí je jednou ze sledovaných veličin v rámci měření, indikující možný dopad VR sickness na jasnost instrukcí.

Odchytky mezi chováním, výkonem, a tělesným stavem uživatele bez prezenze VR sickness, s uživatelem, u kterého byla evokována VR sickness nekontrolovanou projíždkou po hale, jsou v rámci měření zaznamenávány a porovnávány.



Obrázek 4-11: Subjekt stiskávající nápovědní tlačítko



Obrázek 4-12: Monitor počítající počet stisknutí červeného tlačítka

#### 4.4 Postup a organizace měření

Samotné měření bylo prováděno na několika různých lokalitách. Jednotliví účastníci měření byli kontaktováni, a následně osobně navštíveni společně s potřebnou technikou. Přenosnost VR HMD Meta Quest 2 umožnila takto flexibilní způsob, jakým provádět měření a přizpůsobit se mnoha různým podmínkám.

Po obeznámení se všemi náležitostmi nadcházejícího měření, subjekt vyplnil vstupní dotazník.

Po vyplnění vstupního dotazníku a připravení HMD Meta Quest 2, bylo provedeno uchycení potřebných GSR senzorů na tělo subjektu, a jejich sladění se softwarem CAPTIV, současně běžícím na nedalekém notebooku. Byla zajištěna funkčnost všech potřebných periférií a prostředků pro záznam průběhu měření.

VR měření bylo prováděno na fyzicky schopných subjektech, při pokojové teplotě, ve vnitřních prostorách, v dostatečně velkém prostoru, ve stoje. Subjekt byl osazen VR headsetem, a bylo jim poskytnuto krátké instruktáže na ovládání, a čas na uzpůsobení se kontrole a pocitu VR. Následně bylo zahájeno nahrávání, a spuštěna jedna z verzí VR montážní aplikace. Pořadí, jaká verze aplikace je přehrána první nebo druhá, bylo čistě náhodné. Během běhu aplikace byl subjekt sledován, a jednotlivé měřené hodnoty a relevantní informace byly zaznamenávány. Po dokončení všech kroků v rámci dané aplikace, byl celý proces měření ještě jednou opakován s druhou verzí aplikace. Po dokončení všech kroků i v rámci druhé aplikace, byl subjektu sundán VR headset a měřicí senzory, a byly požádáni o vyplnění NASA TLX a SSQ dotazníku.

Během celého procesu měření byly subjekty hlídány, a bylo jim poskytováno potřebného času na seznámení se s VR prostředím. Případně jim byl poskytnut také nutný čas na odpočinek/vzpamatování se z případné VR sickness. V případě nouze bylo subjektům během těchto situací asistováno. Po shromáždění všech potřebných dat, bylo měření ukončeno. Data následně byla analyzována, evaluována, porovnána a interpretována za pomoci několika metodik. Výsledky měření jsou zahrnuty v rámci jednotlivých podkapitol kapitoly 4.5.

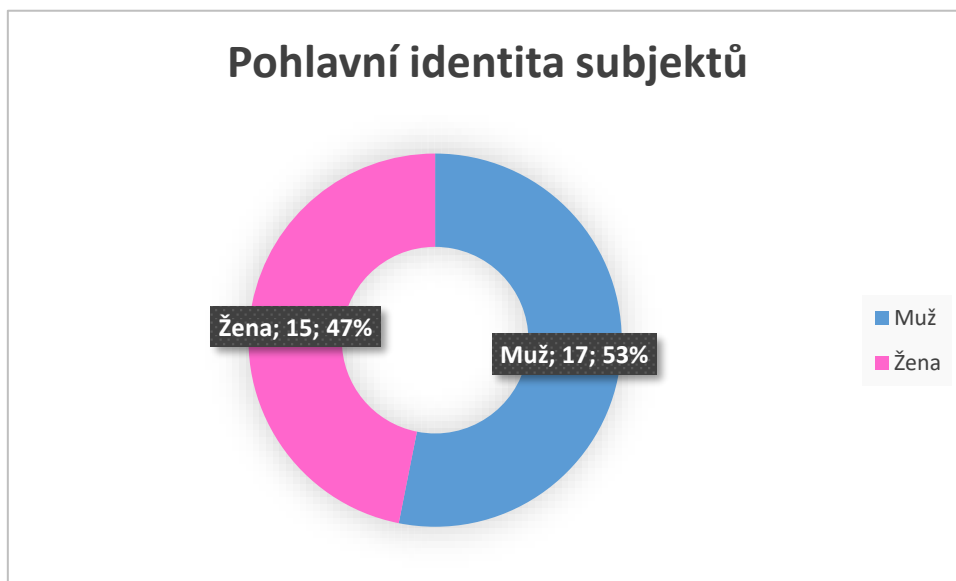
## 4.5 Výsledky měření

Výsledky měření byli rozděleny na základě použitých metodik a prostředků. Kapitola nejprve představuje data o subjektech v rámci vstupního dotazníku. Následovány subjektivními měřicími metodami VR sickness v podobě dotazníků NASA TLX a SSQ. Další metodikou je zde interpretace dat GSR senzorů v prostředí softwaru CAPTIV, a záznamu průběhu měření subjektů nahrávací funkcí Meta Quest 2. Poslední metodiky se opírají o zbylá data zachycena v rámci měření. Konkrétně čas, za který byli subjekty schopni dokončit jednotlivé aplikace, a jasnost instrukcí. V posledním bodě jsou uvedeny limitace a problémy které figurovali v rámci měření.

Analýza a interpretace dat byli provedeny v prostředí programu CAPTIV, sledování jednotlivých VR záznamů, a dalších pomocných softwarů jako tabulkový procesor Microsoft Excel. Byly brány v potaz faktory, vyskytnuté během jednotlivých měření, které mohli k výsledným hodnotám přispět. U výsledných dat bylo porovnáváno, zdali souhlasí s předešlými studii nebo nikoliv.

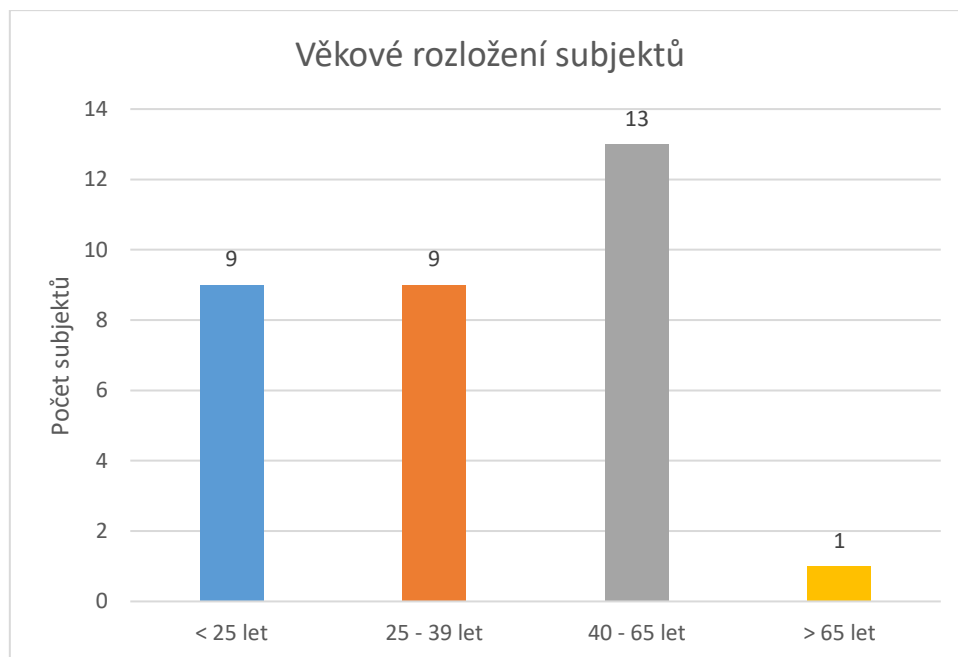
### 4.5.1 Subjekty a vstupní dotazník

Celkem se realizovaného měření VR sickness zúčastnilo 32 subjektů. Byla vynaložena snaha o nalezení a zapojení subjektů, kteří by poskytli, pokud možno co nejvyváženější půdu a kombinaci vlastností figurující při VR sickness, jako pohlaví, věk, náchylnost na kinetózu atd.



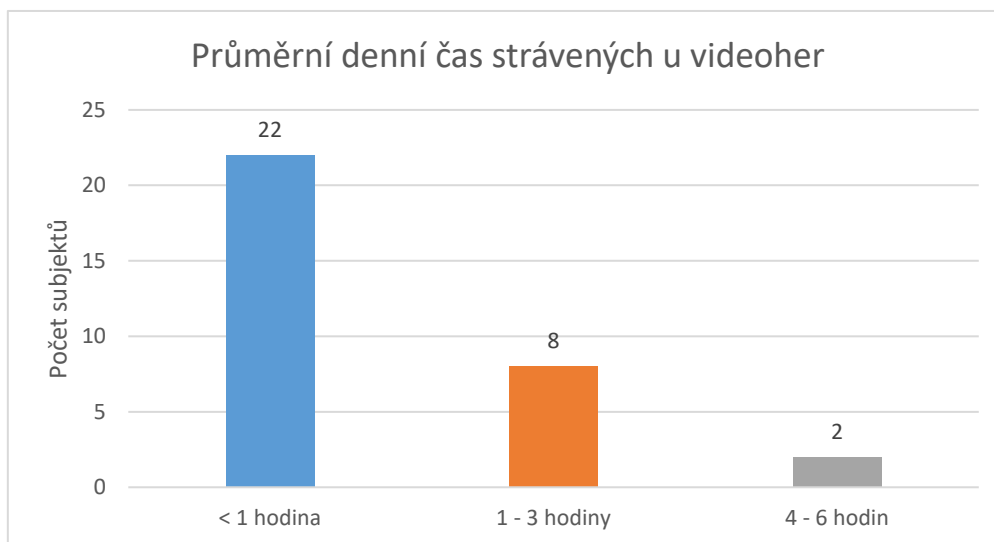
Graf 4-1: Pohlavní rozložení subjektů

Všech 32 subjektů jsou téměř vyrovnaní v rozdělení podle pohlaví. Čítajíc 17 mužů a 15 žen. Toto skoro rovnoměrné rozložení může dopomoci pro přesnější analýzu dopadů VR sickness na jedince, v závislosti na jejich pohlaví.



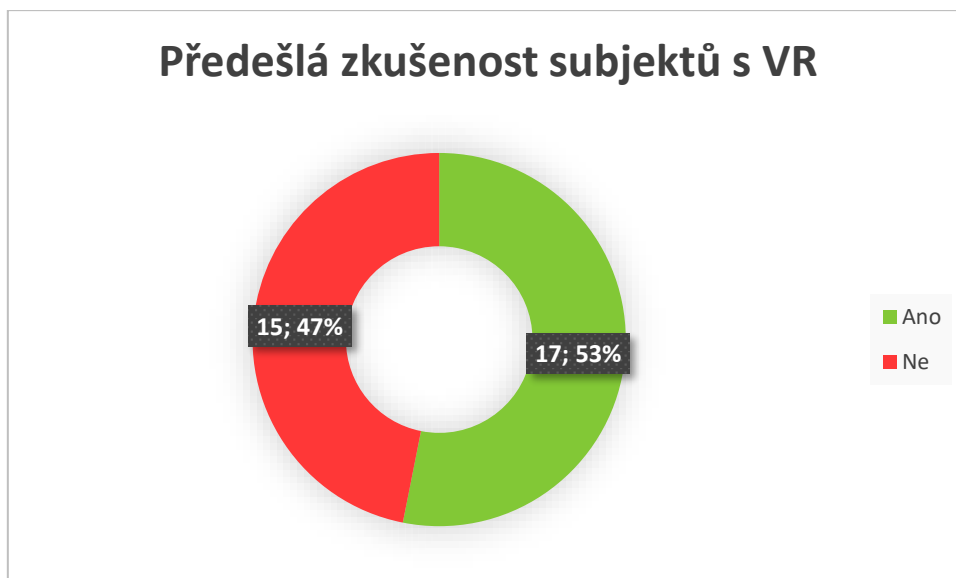
**Graf 4-2: Věkové rozložení subjektů**

Subjekty byly rozděleny do čtyř věkových kategorií. První věková kategorie představuje jedince věku nižší než 25 let. Druhá kategorie zahrnuje jedince věku 25 až 39 let. Třetí kategorie jsou jedinci od věku 40 až 65 let. Poslední kategorie jsou jedinci věkově nad 65 let. Bylo napočítáno celkem 9 jedinců pod 25 let, 9 jedinců ve věku 25 až 39, 13 jedinců mezi lety 40 až 65, a jeden jedinec s věkem vyšší než 65. Částečně je zde převažující třetí věková kategorie 40 až 65 let, a je zde mírné zastoupení kategorie 65 let a starší.



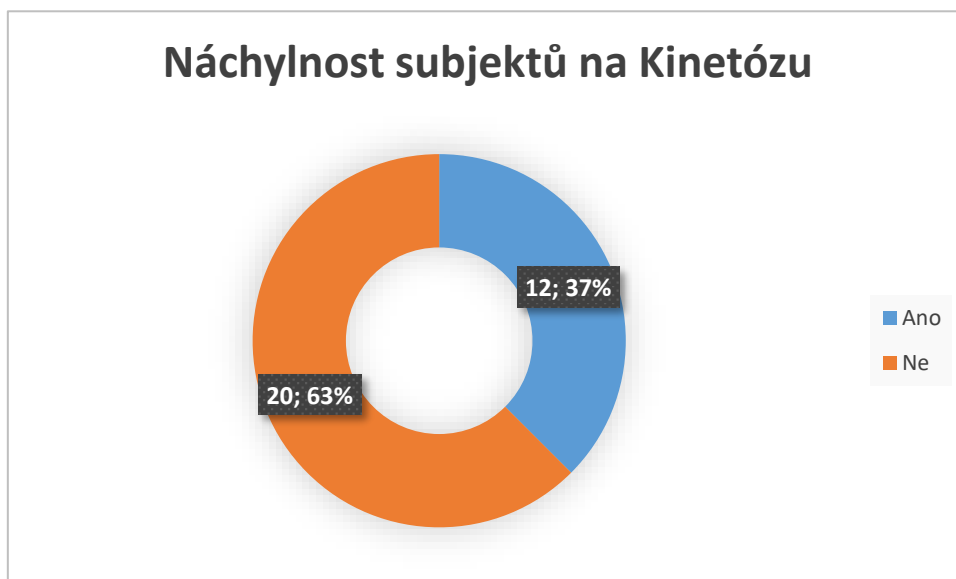
**Graf 4-3: Průměrný denní čas strávený subjekty u videoher**

Subjekty se stačily rozdělit do pouhých tří nejnižších kategorií průměrného denního času strávených u videoher, ačkoliv vstupní dotazník disponoval až šesti kategoriemi. Těmito třemi obsazenými kategoriemi jsou průměrný denní čas strávený u videoher menší než 1 hodina s celkem 22 subjekty. Kategorie 1 až 3 hodiny, čítající 8 subjektů. A v poslední řadě kategorie 4 až 6 hodin, obsahující pouze 2 subjekty. Zbývající kategorie 7 až 9, 10 až 12, a více než 12 hodin zůstali neobsazené.



**Graf 4-4: Předešlá zkušenost subjektů s VR**

Předešlá zkušenost s VR hraje významnou roli v rámci měření, a proto byly subjekty rozděleny také podle toho, zdali mají s touto technologií již zkušenost. Z 32 subjektů uvádí nadpoloviční většina s počtem 17 subjektů, že ano. Zbývajících 15 subjektů uvedlo, že s VR doposud neměli zkušenost.



**Graf 4-5: Náchylnost subjektů na kinetózu**

Poslední podstatnou veličinou v rámci vstupního dotazníku byla otázka na náchylnost subjektů na kinetóze. Celkem 12 subjektů zde uvedlo že jsou náchylní na kinetózu, a zbývajících 20 subjektů že ne.





Obrázek 4-13: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (1)



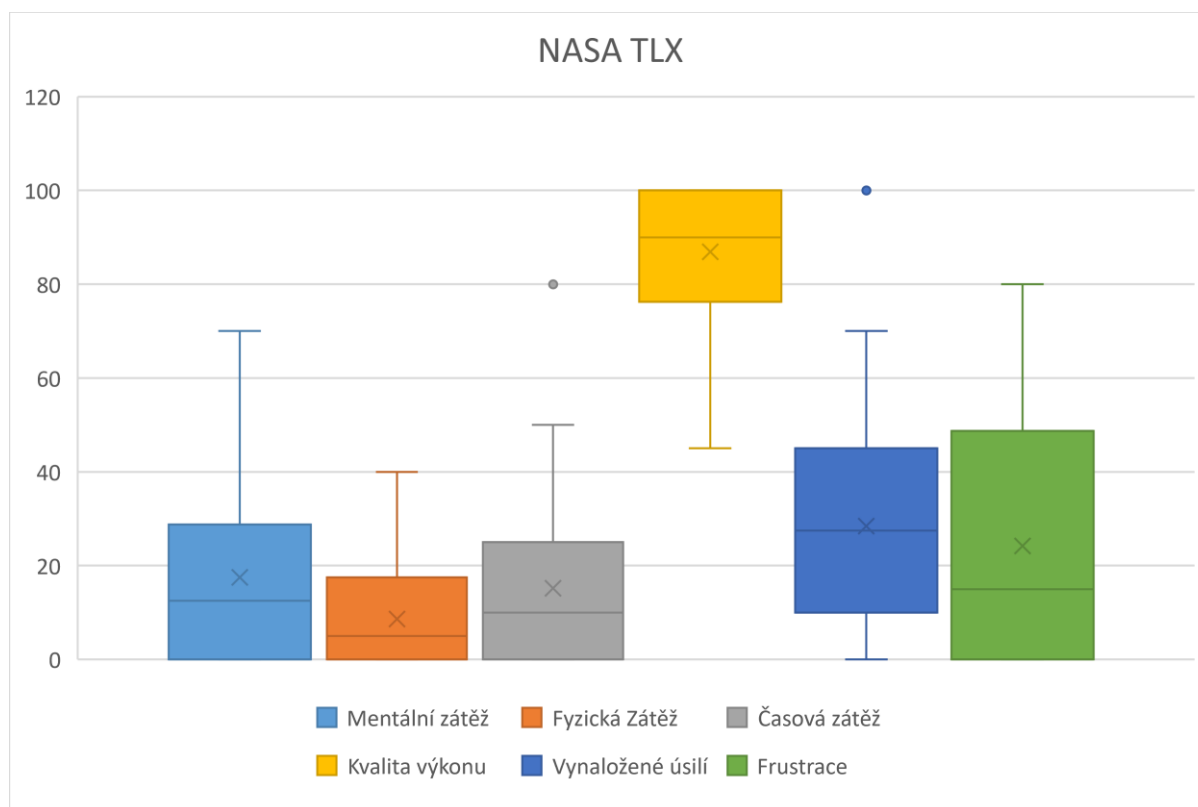


Obrázek 4-14: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (2)



**Obrázek 4-15: Ilustrační záběry průběhu měření subjektu (3)**

#### 4.5.2 NASA TLX

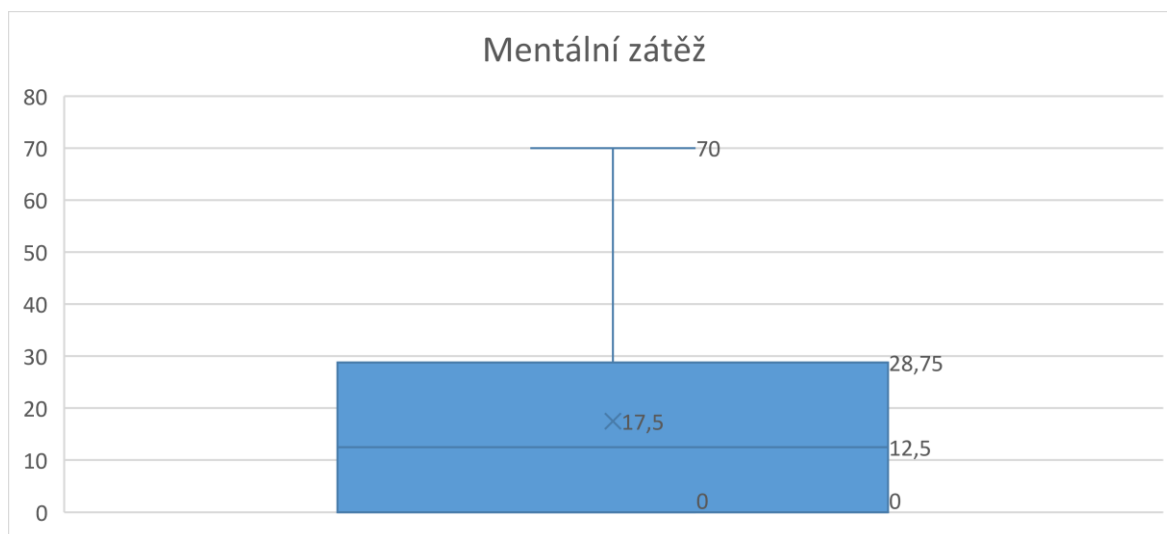


Graf 4-6: Porovnání naměřených hodnot faktorů NASA TLX

Data z dotazníků NASA TLX byla zpracována v podobě krabicových grafů jakožto soubor všech faktorů dotazníku, tak jako individuální pohled na jednotlivé faktory. Při pohledu na všechny faktory současně můžeme zpozorovat, že podle mediánu (Q2), nejvýše byli uváděny hodnoty v otázce vynaloženého úsilí. Následovaném frustrací s nevyšším rozpětím kvartilu Q1 (25 percentil) až Q3 (75 percentil), označovaném také jako IQR. Frustrace také naznačuje vysokou míru proměnlivosti hodnot, jak lze vidět na délce „vousu“ daného boxu, jenž ukazuje nejzazší uvedenou hodnotu ve vzdálenost 1,5násobku rozpětí IQR. IQR s kombinací s délkou svého vousu, dělá z frustrace faktor s největším rozdílem v hodnotách udaných subjekty. Třetí v pořadí je mentální zátěž, jejíž IQR není natolik velká jako u frustrace, avšak délka vousu tohoto boxu je zdaleka největší. Tyto 3 faktory byli pro subjekty v závislosti na jejich odpovědích nejvíce závažné. Fyzická zátěž se zde vyskytuje jakožto nejnižší hodnocená položka, následovaná časovou zátěží jakožto druhou nejnižší. Tyto faktory nepředstavovali pro subjekty až tak veliký problém v porovnání s ostatními. Poslední položkou je zde ohodnocení kvality svého výkonu, u kterého se většina subjektů hodnotí velmi uspokojivě hodnotami Q1 a Q3 v rozmezí 15 až 20. Časová zátěž a vynaložené úsilí mají kromě jiného taky své odlehlé hodnoty označené jednotlivými body, vzdálenými od zbytku boxu a jeho vousu.



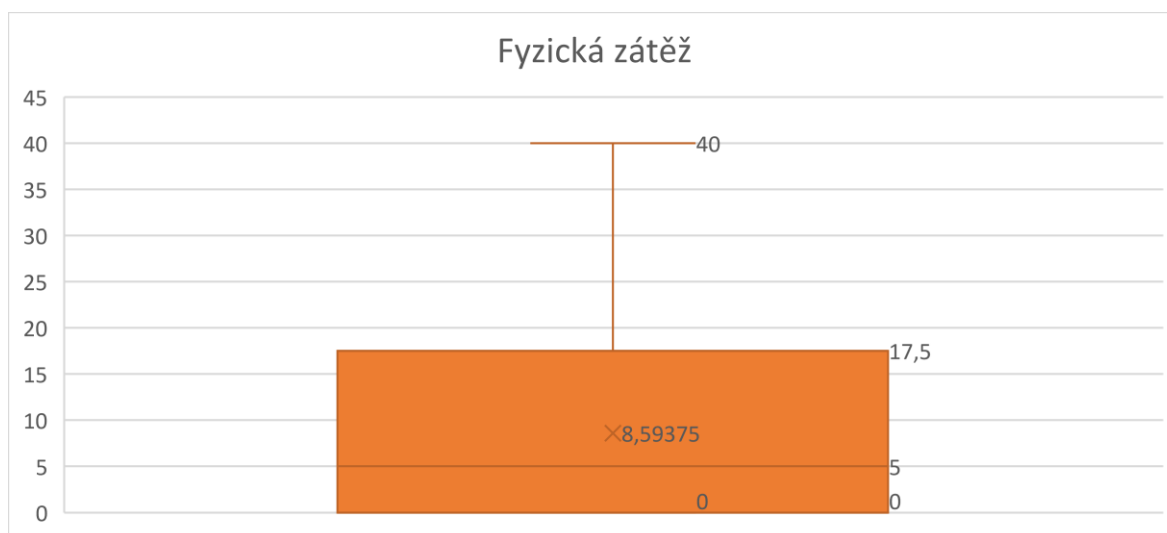
## Mentální Zátěž



Graf 4-7: Výsledné hodnoty faktoru mentální zátěže na subjekty

Při pohledu na samostatnou položku mentální zátěž dotazníku NASA TLX, si lze všimnout že celkové rozpětí uvedených hodnot je 0 až 70. Z tohoto rozpětí se 25 percentil (Q1) nachází na hodnotě 0, a 75 percentil na hodnotě 28,75. V rozpětí IQR (Q1 až Q3), se 50 percentil (Q2) nachází na hodnotě 12,5, a průměrná hodnota (mean) je zde 17,5. Celkově nám graf říká, že většina subjektů nepocívala během měření přílišnou mentální zátěž, a délka vousu nám říká, že pouze menší část (zhruba čtvrtina) subjektů udala hodnoty větší než mírné.

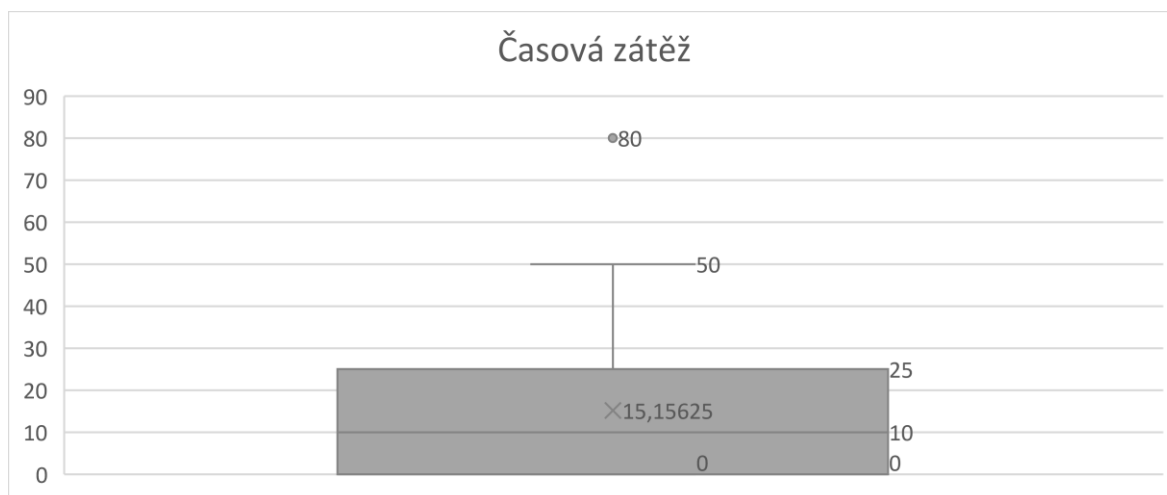
## Fyzická zátěž



Graf 4-8: Výsledné hodnoty faktoru fyzické zátěže na subjekty

U fyzické zátěže se rozpětí hodnot pohybovalo v rozmezí 0 až 40. 25 percentil leží na hodnotě 0, a 75 percentil má hodnotu 17,5. 50 percentil (medián) je na hodnotě 5, a průměrná hodnota je na hodnotě skoro 8,6. Fyzická zátěž tedy představovala nejnižší hodnocený faktor dotazníku NASA TLX. Subjekty svými odpověďmi, tak svým chováním během měření, nevykazovali znatelné známky fyzické námahy nebo únavy.

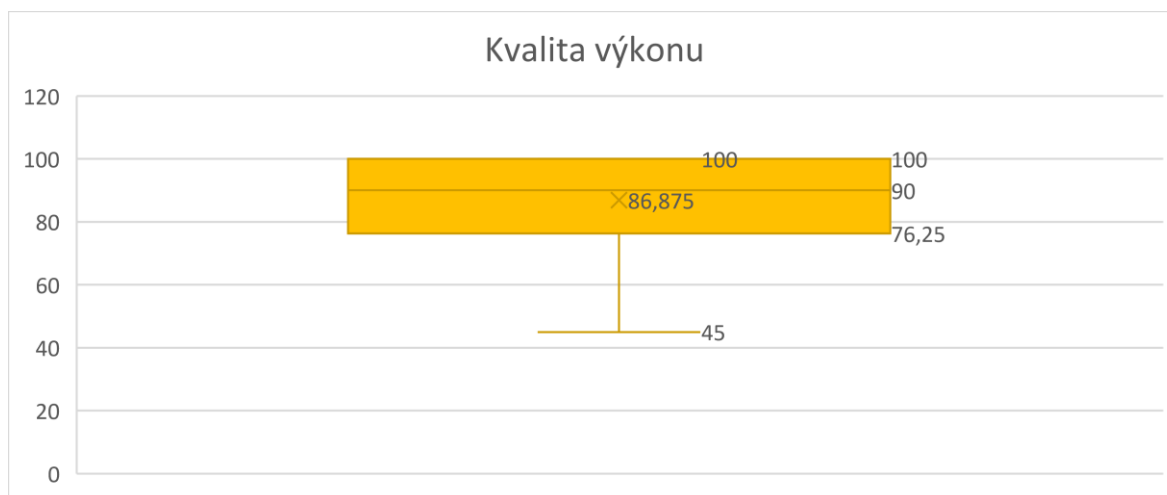
## Časová zátěž



Graf 4-9: Výsledné hodnoty faktoru časové zátěže na subjekty

Hodnoty u pocitu časové zátěže dosahovali rozpětí 0 až 50, s jednou odlehlou hodnotou 80. 25 percentil se nachází na hodnotě 0, a 75 percentil na hodnotě 25. Medián má zde hodnotu 10, a průměrná hodnota leží na 15,15. Časová zátěž představovala druhý nejnižší ohodnocený faktor ze strany subjektů. Na subjekty nebyl v rámci měření vyvíjen žádný časový tlak, a tak hodnocení nebyli ovlivněni ničím jiným než subjektivním vnímáním času. Subjekty uváděli že jim čas plynul rychleji, a mysleli si, že strávily ve VR méně času, než skutečně uběhlo. Takto lze vysvětlit nízkou časovou zátěž na subjekty.

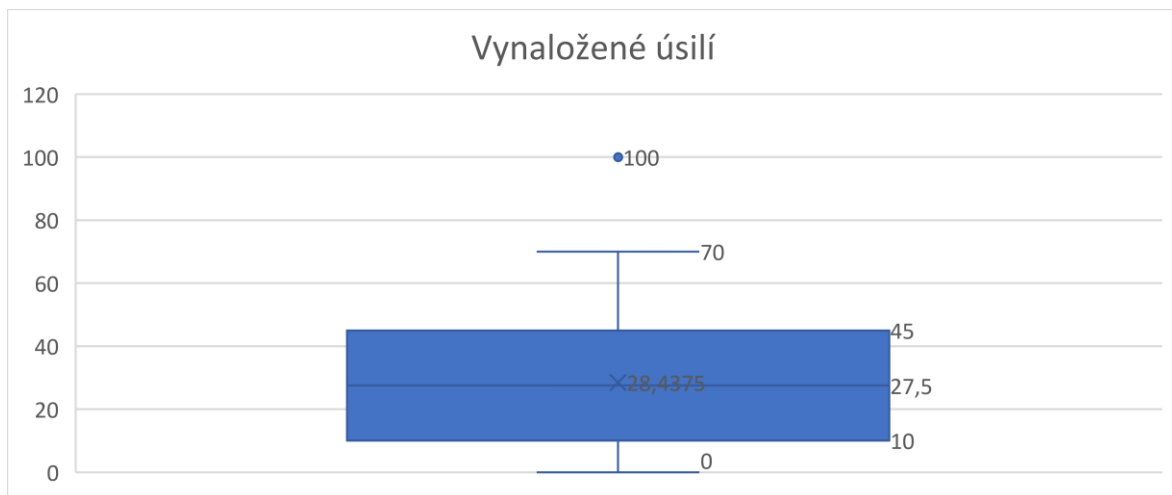
## Kvalita výkonu



Graf 4-10: Výsledné hodnoty faktoru kvality výkonu subjektů

Hodnoty kvality výkonu subjektů se pohybují v rozpětí 45 až 100. 25 percentil má hodnotu 76,25, zatímco 75 percentil dosahuje maximální hodnoty 100. Medián je na poměrně vysoké hodnotě 90, a průměr je nedaleko na hodnotě skoro 87. Tři čtvrtiny subjektů jsou tedy se svým výkonem velice spokojeni, a zbývající čtvrtina udává hodnoty relativně vysoké až střední. U hodnocení svého výkonu byli k sobě jednotlivé subjekty převážně štedří. Jako jediné poznámky vůči svým výkonům měli to, že mohli být rychlejší, nebo že mohli dávat větší pozor při audio instrukcích, aby nemuseli zbytečně hledat ukazatele k dalšímu kroku.

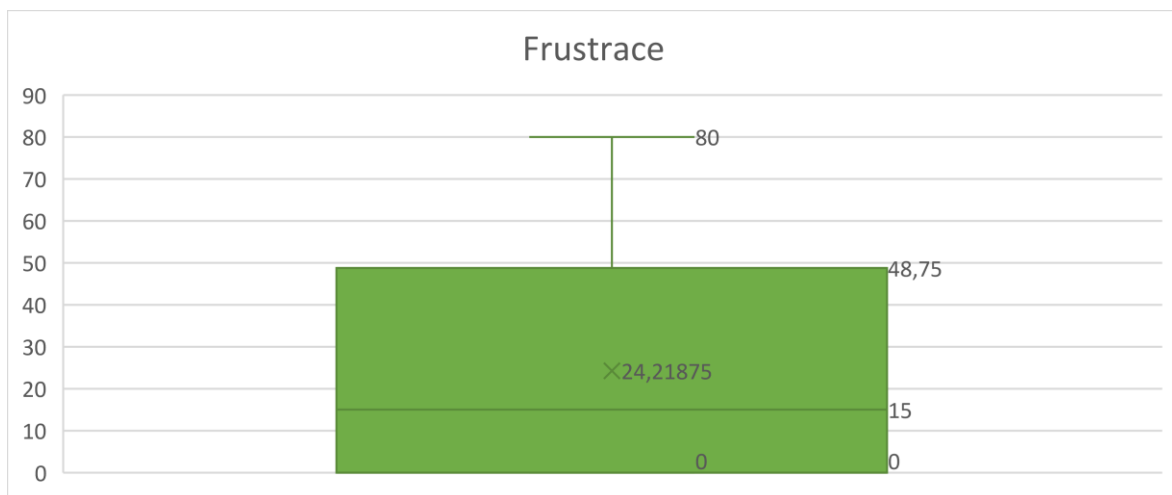
## Vynaložené úsilí



Graf 4-11: Výsledné hodnoty faktoru vynaloženého úsilí subjektů

U vynaloženého úsilí se hodnoty rozpínají mezi 0 až 70, s výjimkou jediné odlehlé hodnoty 100. 25 percentil má hodnotu 10, a 75 percentil má zde hodnotu 45. Medián je na hodnotě 27,5, a průměr má hodnotou zhruba 28.4. Celkově subjekty uváděly, že nemuseli vynaložit značné úsilí pro dokončení úloh v rámci měření, nebo při vyrovnání se s účinky VR sickness. Avšak našlo se i pár subjektů kteří uvádí velmi nízké až nulové hodnoty, tak i subjekty nad 75 percentilem u kterých se vynaložené úsilí pohybovalo na střední nebo vyšší úrovni.

## Frustrace



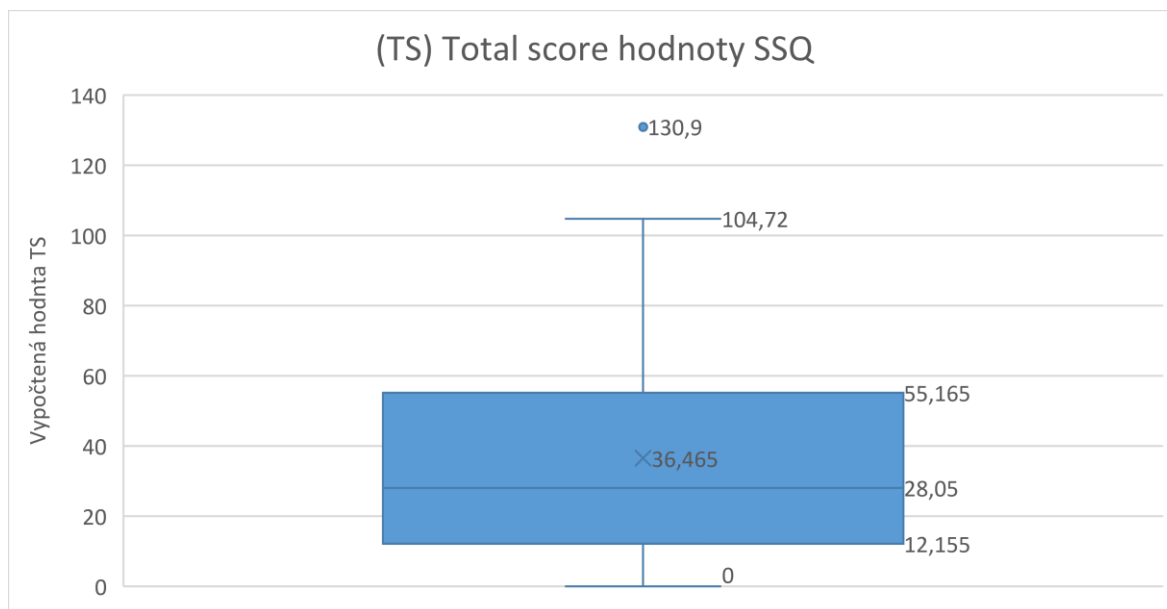
Graf 4-12: Výsledné hodnoty faktoru frustrace subjektů

Frustrace se rozpíná od hodnoty 0 do hodnoty 80, a tvoří tak nejširší rozprostření hodnot ze všech ostatních faktorů. Zároveň je zde nejširší zóna mezi 25 a 75 percentilem (IQR), s hodnotami od 0 do 48,75. Medián má hodnotu 15, a průměr má hodnotu 24.2. Většina subjektů zde uváděla mírnou až středně silnou frustraci během měření, zatímco menšina uváděla větší než střední hodnoty, a to až po znatelně vysoké hodnoty. Subjekty často projevovali frustraci nad dlouhým časem čekání, než audio instrukce nebo jízda po hale vyvolávající VR sickness skončí, a budou moci začít pracovat. Nadále se také subjekty často frustrovali nad špatnými kolizními boxy ruky a objektů.

### 4.5.3 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Data z SSQ dotazníků jsou analyzována a interpretována ve třech sekcích. První sekce se zaměřuje na celkovou hodnotu TS. Druhá sekce se zaměřuje na to, jak jednotlivé podhodnoty SSQ (N, O, D), figurovali během měření, a jakým způsobem afektovali subjekty. Třetí sekce nahlíží na jednotlivé symptomy SSQ dotazníku, konkrétně na jejich závažnost a četnost.

#### Celkové SSQ hodnoty



Graf 4-13: Boxový graf SSQ – total score (TS) subjektů

Pro každý subjekt byla vypočítána hodnota TS v rámci SSQ dotazníku. Vhodno připomenou že hodnoty závažnosti cybersickness menší než 5 jsou brány jako zanedbatelné, zatímco hodnoty větší než 20, jsou již brány jako zlé. Výsledné hodnoty TS napříč subjekty jsou zprůměrovány a vizualizovány na přítomném boxovém grafu. Graf ukazuje že hodnoty TS se pohybovali v rozmezí 0 až 104,72, s jednou odlehlou hodnotou dosahující hodnoty až 130,9. 25 percentil se nachází na hodnotě 12,15, což je hodnota již naznačující značné projevy symptomů. 75 percentil má hodnotu 55,16. Hodnota, která je 2,75krát vyšší, než je hraniční hodnota pro shledání symptomů jako zlé ( $>20$ ). Medián se téže pohybuje v hodnotách nad touto hranici, a to na hodnotě 28. Posledně zbývá zmínit průměr, který má hodnotu 36,4.

Většina subjektů překračovala mezní hodnotu pro shledání symptomů jako zlé. Pouze hrstka subjektů vykázala hodnoty SSQ nižší než 5, a část subjektů se pohybovala ve značně vyšších hodnotách nikoliv pouze 2,75krát, ale až 5krát vyšší než hraniční hodnota 20. Lze tedy konstatovat že podle dat poskytnutými subjekty, se většina subjektů se svými TS hodnotami pohybovali ve více než závažných hodnotách symptomů cybersickness. Jízda nekontrolovatelným nízkozdvíhým vozíkem halou po dobu 80 vteřin, stačila pro to, aby subjekty zhodnotily své pocity takto vážně. I přes viditelnou závažnost cybersickness z dat, tak fyzických reakcí subjektů, nepředstavovala VR sickness značnou překážku pro splnění montážního úkolu, nebo vliv na výkon subjektu. Takřka ve všech případech symptomy odezněli v rámci několika desítek vteřin po ukončení jízdy, a uklidněný subjekt pokračoval v montážním úkolu. Reakce tudíž byla silná, avšak krátkodobá.

Avšak některé subjekty v rámci několika dní od měření uváděly bolesti hlavy nebo migrény. Tyto subjekty byli ze starších věkových kategorií a měli sklony ke kinetóze. U jiných kategorií tento jev pozorován nebyl.

**Tabulka 4-1: Tabulka průměrných hodnot TS v závislosti na různých kategoriích subjektů**

Subjekt	Průměrná hodnota TS
<b>Pohlavní identita</b>	
<b>Muž</b>	30,80
<b>Žena</b>	42,89
<b>Věková kategorie</b>	
<b>&lt;25 let</b>	31,58
<b>25–39 let</b>	50,28
<b>40–65 let</b>	31,93
<b>&gt; 65 let</b>	14,96
<b>Průměrný denní čas u videoher</b>	
<b>&lt;1 hodina</b>	41,65
<b>1–3 hodiny</b>	28,99
<b>4–6 hodin</b>	9,35
<b>Předešlá zkušenost s VR</b>	
<b>Ano</b>	45,32
<b>Ne</b>	26,43
<b>Náchylnost na kinetózu</b>	
<b>Ano</b>	50,80
<b>Ne</b>	27,86

Na naměřené průměrné hodnoty subjektů bylo při analýze přihlíženo v rámci několika kategorií. Významné rozdíly se u subjektů projeví v závislosti na jejich pohlaví, věku, času u videoher, zkušeností s VR, a náchylnosti na kinetózu.

U pohlaví bylo zjištěno že ženy dosáhly vyššího skóre TS, a tudíž silnější účinky cybersickness, oproti mužům. Toto zjištění se tudíž přiklání k tvrzení předešlých studií, že ženy jsou náchylnější na cybersickness. [4], [5]

Podle věkové kategorie jsou nejnáchylnější věkovou skupinou jedinci ve věku 25 až 39. Následovaní jsou jedinci ve věku 40 až 65, za kterými velmi těsně jsou jedinci mladší 25 let. Subjekty nad 65 let vykázaly oproti ostatním věkovým kategoriím nejmenší náznaky cybersickness. Výsledky poukazují na to, že mladí dospělí a jedinci ve středním věku jsou nejnáchylnější skupinou na cybersickness. Výsledky jsou zavádějící, avšak tento úkaz není neočekávaný, jelikož názory předešlých studií nejsou do dnešní doby jednoznačné, a jejich výsledky se liší. Starší jedinci jsou někdy uváděni jakožto náchylnější na cybersickness kvůli zhoršené motorice, a mladší zase protože nejsou ještě dostatečně vyvinutí. Je tudíž doporučeno dalších studií v otázce vlivu věku na dopady cybersickness. [4], [12]

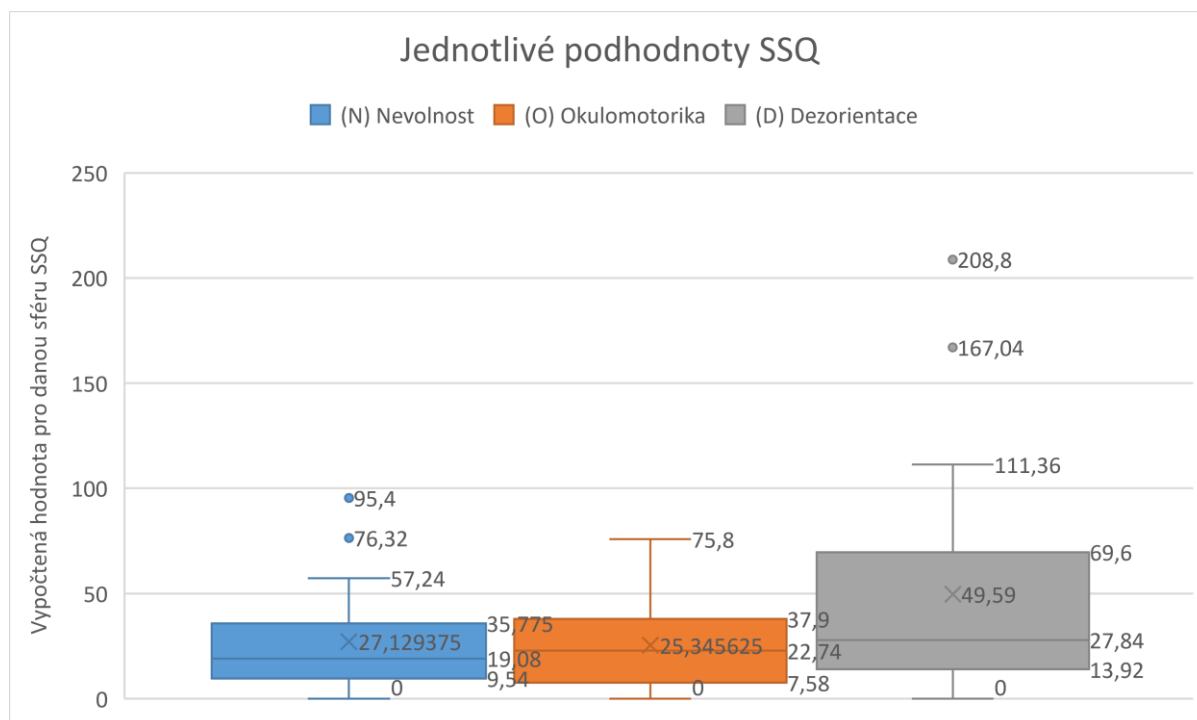
Jednoznačné výsledky představuje kategorizace na základě stráveného času u videoher, kdy jedinci, kteří tráví průměrně více času hraním videoher, jsou méně náchylní na cybersickness. Výsledek se tudíž shodují s předešlými studiemi. [6], [12]

U předešlé zkušenosti s VR, jedinci, kteří již VR použily vykázali průměrně vyšší hodnoty TS oproti těm, co VR předtím nepoužily. V tomto případě je nutno připomenout subjektivní národu hodnocení SSQ dotazníku, která mohla přispět k tomuto neintuitivnímu závěru. Výsledky se tedy poměrně rozcházejí s předešlými studiemi. [4], [15]

Nakonec, Subjekty náchylní na kinetózu vykazují hodnoty TS skoro dvojnásobně vyšší. Potvrzující korelaci mezi motion sickness a VR sickness, a potvrzující tak předešlá zjištění. [8], [10], [12]



## Podhodnoty SSQ



**Graf 4-14: Porovnání jednotlivých podhodnot (N, O, D) dotazníku SSQ**

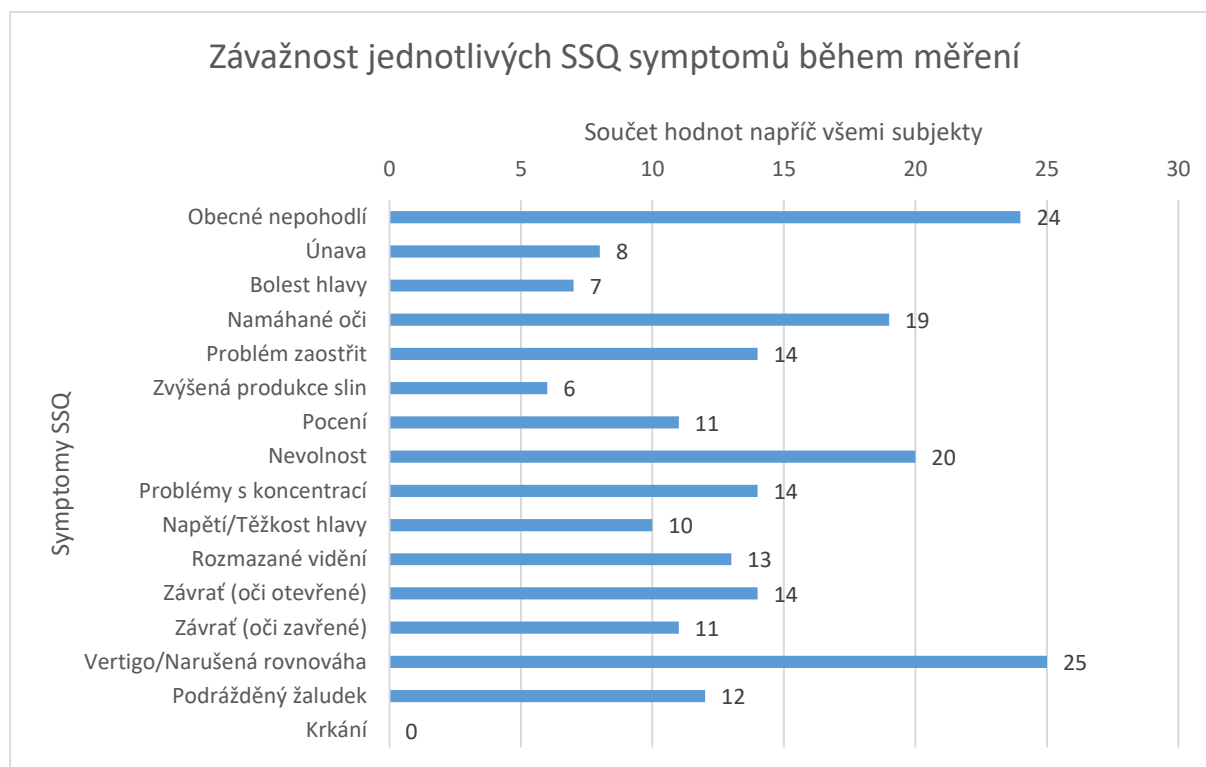
Porovnání jednotlivých podsložek SSQ poskytuje obraz toho, jak vyvolaná VR sickness během měření ovlivnila subjekty, a jaká její složka hrála největší roli. Přiložený boxový graf zobrazuje jednotlivé podhodnoty SSQ (N, O, D). Lze vidět že během VR měření, dominantním problémem pro subjekty byla dezorientace. Následovaná okulomotorickými problémy. A jako nejméně závažná je zde uváděna nevolnost. Výsledky jsou srovnatelné s předešlými zjištěními o závažnosti jednotlivých symptomů VR sickness. [51]

(N) nevolnost má celkové rozpětí hodnot od 0 do 57,24, a mající 2 odlehlé hodnoty 76,32 a 95,4. 25 percentil má hodnotu 9, a 75 percentil hodnotu 35,75. Medián se nachází na hodnotě 19,08, a průměr mající hodnotu 27,12. Subjekty nevykazovali během měření v mnohých případech žádné znatelné známky gastroenterologických potíží, viditelného slintání nebo značně zvýšeného pocení. Subjekty komentovali nejvíce spíše na obecný pocit nevolnosti.

(O) okulomotorika se rozpíná od hodnoty 0 až 37,9, bez žádných odlehlých hodnot. 25 percentil má hodnotu 7,58, a 75 percentil hodnotu 37,9. Hodnota mediánu je 22,74, a hodnota průměru je 25,34. Subjekty v rámci SSQ dotazníku často uváděly symptomy spojené s okulomotorikou jako obecné nepohodlí, namáhané oči nebo problém zaostřit. Avšak subjekty viditelně nevykazovali během měření, ani poté, značné problémy spojené se zrakem i přes to, že někteří z nich měli silné dioptrie. Nízké hodnoty se také mohou vysvětlit tím, že tato podhodnota používá standardně nejmenší násobitel pro výpočet výsledku 7,58.

(D) dezorientace nabývá hodnot od 0 do 111,36, mající dvě odlehlé hodnoty 167,0 a 208,8. 25 percentil se nachází na hodnotě 13,92, a 75 percentil na 69,6. Hodnota mediánu je 27,84, a průměrná hodnota je 49,59. Z komentářů subjektů a fyzických reakcí některých z nich během měření, vyplynulo že nejčastěji subjekty trpěli na závratě, pocit nestability, vertigo a nevolnost. Ať již souzeno podle mediánu, průměrně hodnoty, celkového rozpětí či pouze IQR, nebo nejvyšší uvedenou hodnotou, ve všech případech je podhodnota (D) dezorientace ta nejvyšší. Tudíž lze konstatovat že pro subjekty největším problémem byl v rámci SSQ problém s dezorientací.

## Jednotlivé symptomy SSQ



**Graf 4-15: Součet udaných hodnot závažnosti jednotlivých symptomů SSQ napříč subjekty**

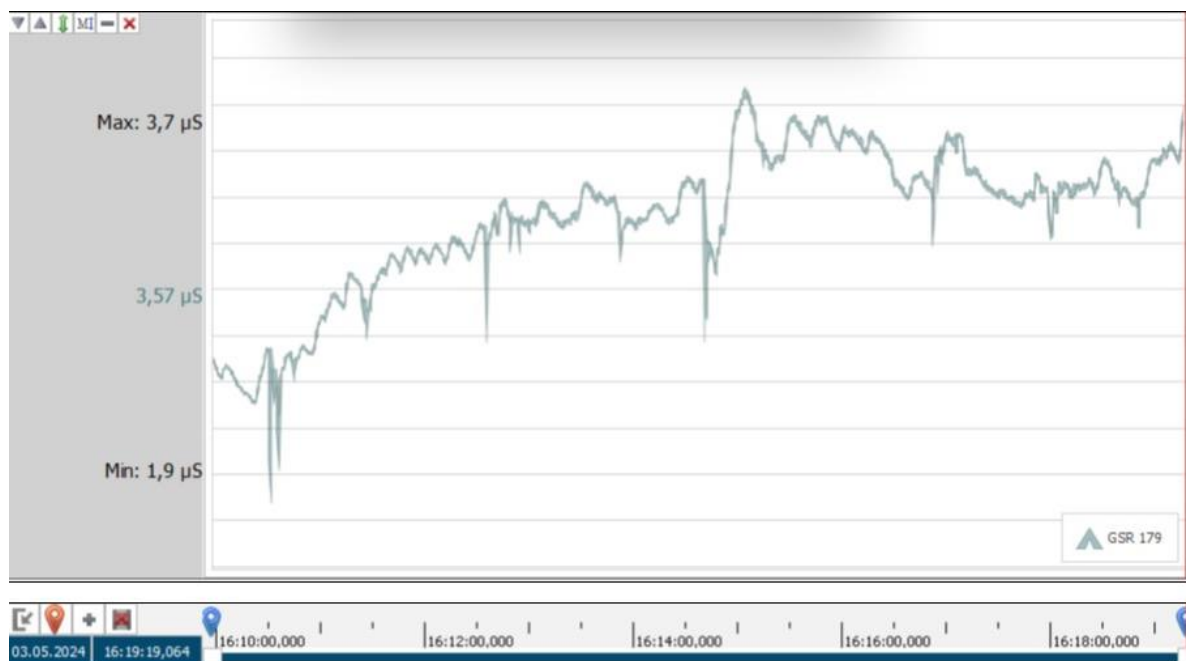
Lze se také zaměřit na sumu udaných hodnot jednotlivých symptomů SSQ, napříč všemi subjekty. Hodnoty 0 až 3 u všech subjektů, u každého symptomu, byly sečteny, aby dali dohromady výsledný graf. Symptomy s vysokou hodnotou jako vertigo, nevolnost a problém zaostřit, jsou zahrnuty při výpočtu hodnoty pro podhodnotu (D) dezorientace. Lze tedy tímto ověřit proč zrovna tato podhodnota SSQ měla značně vyšší hodnoty v porovnání se zbytkem podhodnot (N) nevolnost a (O) okulomotorika, jak lze vidět na předešlém grafu porovnání podhodnot SSQ. Nutno však brát v potaz, že podhodnota (D) dezorientace má navíc také standardně přiřazenou vysokou hodnotu vah 13.92.

Nejvyšší dosažené hodnoty zde nabývá symptom vertigo. Tento symptom bylo možno u mnoha ze subjektů fyzicky pozorovat, a u některých dokonce muselo být asistováno případným jištěním, když se subjektu začala třást nebo podlamovat kolena. Druhým nejvíce ohodnoceným symptomem je zde obecné nepohodlí, které se dá vysvětlit tím, že takřka všem subjektům byla jízda dříve nebo později nepříjemná, a netrpělivě očekávali konec. Jakožto třetí nejvyšší hodnotu zde představovala nevolnost, která podle výpovědi subjektů byla častěji spojena se smyslovou (D) dezorientací než s gastroenterologickou (N) nevolností.

Nejnižší byli ze strany subjektů ohodnoceny symptomy krkání, zvýšené produkce slin a bolesti hlavy. Žádné z těchto symptomů vskutku nebyli viditelně zpozorovány na žádném ze subjektů během měření. Několik subjektů však během několika dní po skončení měření hlásily migrény nebo bolesti hlavy. O tom, zda se jednalo o náhodu nebo opožděnou reakci na VR sickness však není dostatek údajů pro jednoznačné prokázání z důvodu nízkému počtu těchto subjektů.

#### 4.5.4 Analýza VR záznamu a hodnot GSR senzorů

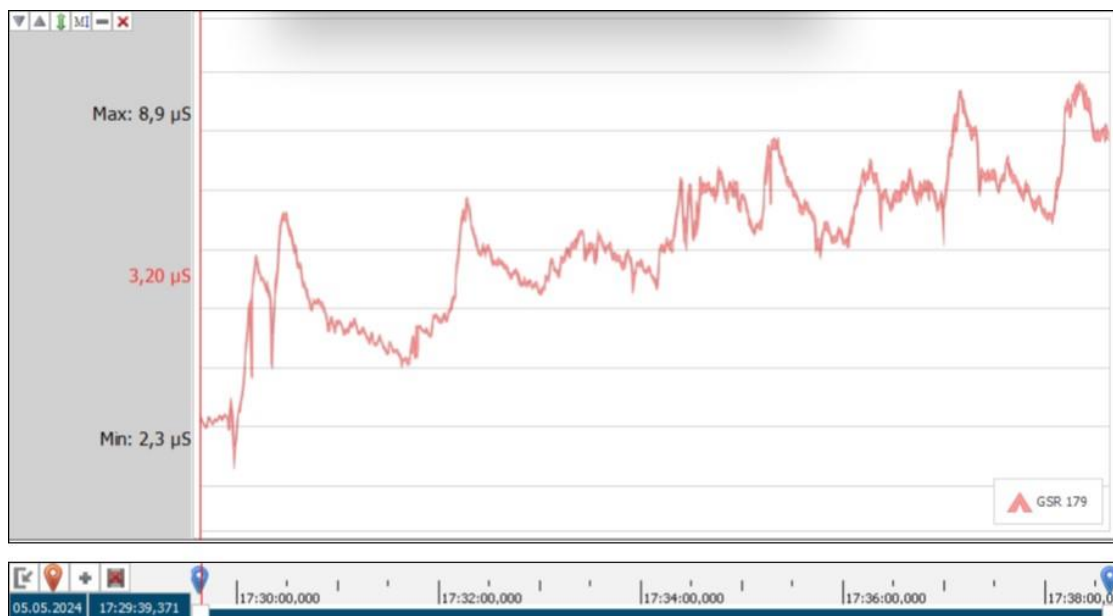
Průběh měření každého subjektu byl zaznamenáván senzory TEA CAPTIV T-SENS GSR, komunikující se softwarem CAPTIV. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v podobě grafu, který sám o sobě může být porovnán mezi jednotlivými subjekty. Zároveň byl však také pořizován záznam ve VR headsetu Meta Quest 2, umožňující sledování toho, co daný subjekt v daný bod měření viděl a dělal. Časovým sladěním těchto dvou záznamů a jejich současné sledování, umožňuje vysledovat reakce subjektů na různé situace během měření.



**Graf 4-16: Graf subjektu bez náchylnosti na kinetózu (VR sickness uprostřed měření)**

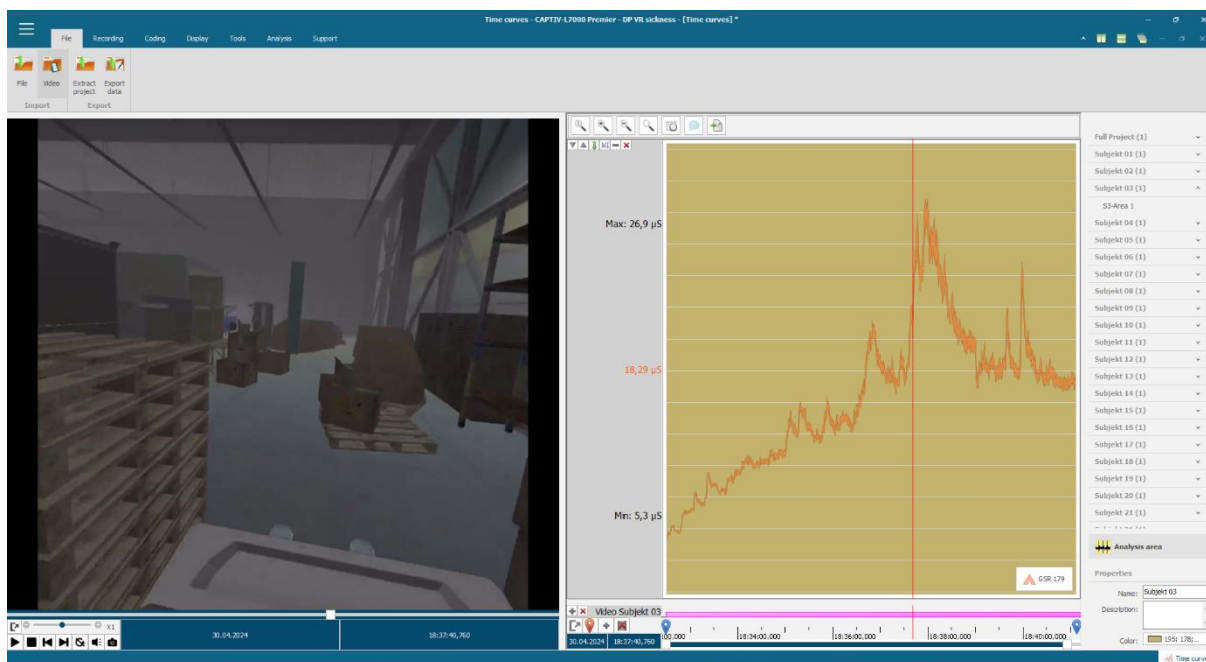
Grafy většiny subjektů nabírají podobu fluktuujícího, avšak stálého růstu. Většina subjektů skončila s hodnotami vyššími než při začátku měření. Průměrně se u subjektů minimální a maximální naměřené hodnoty  $\mu\text{S}$ , během zhruba desetiminutového měření, zvětšily 2,5krát. Avšak reakce subjektů byli rozdílné, a vykazovali v některých případech rozdíl pouze 1,3krát vyšší, ale také až 6krát vyšší.

Subjekty často začínaly na nízké hodnotě a postupně s přibývajícím časem, se jejich hodnoty zvětšovaly. Po dokončení první aplikace, byl subjektu na okamžik sundán VR headset z hlavy pro přepnutí aplikace. Během této doby, kdy subjekt opět vnímá reálný svět kolem sebe, je možno na většině grafů zpozorovat úpadek hodnot (většinou zhruba v půlce grafu).



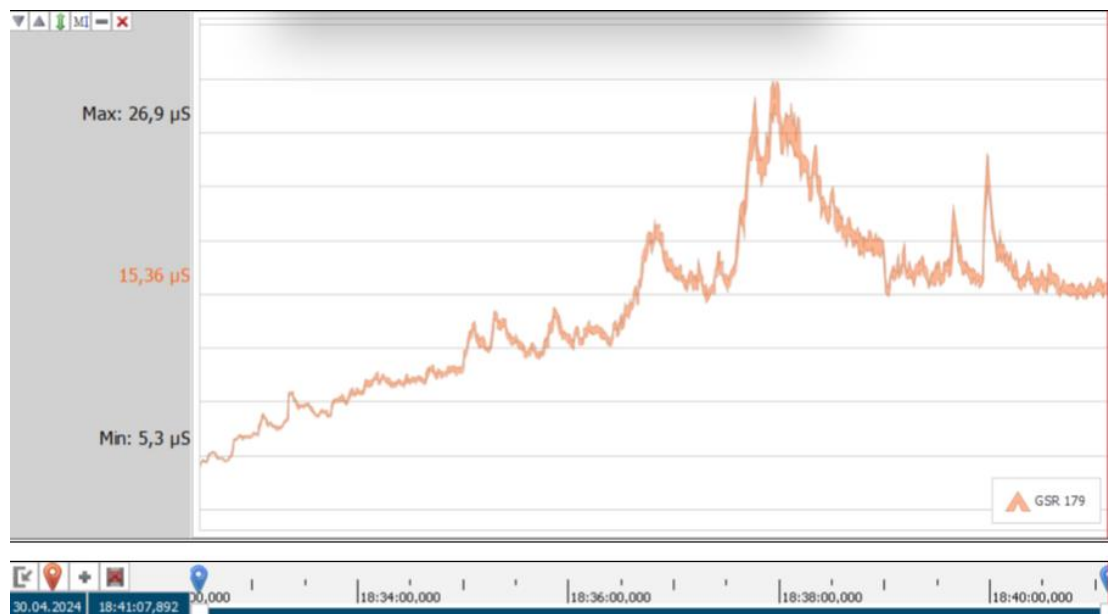
**Graf 4-17: Graf subjektu bez náchylnosti na kinetózu (VR sickness na začátku měření)**

Po skončení VR sickness vyvolávající jízdy po hale, nastal prudký pokles naměřených hodnot  $\mu\text{S}$ . Tento pokles však málokdy dokázal vrátit hodnoty na počáteční, nebo podobnou úroveň. Hodnoty subjektu se nyní pohybovali na nové vyšší úrovni než před vystavením VR sickness.



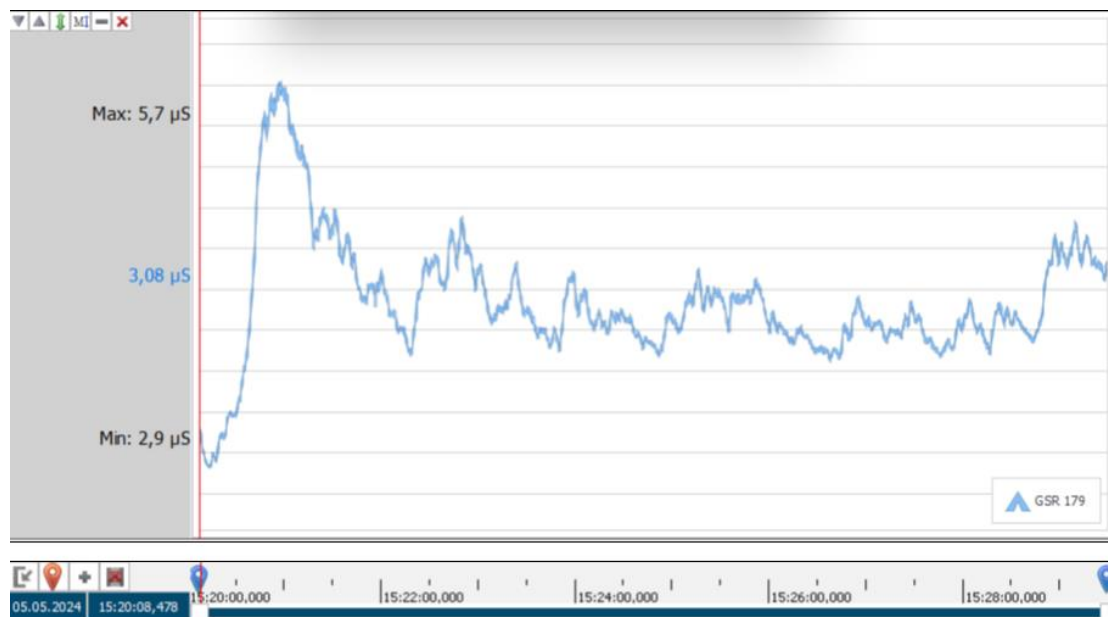
**Obrázek 4-16: Sledování průběhu VR sickness v programu CAPTIV**

Další zaznamenaný jev je ten, že VR sickness vyústila v prudký nárůst hodnot oproti předchozím stabilním hodnotám. Avšak čas strávený subjektem ve VR, je schopný dříve nebo později posunout stabilní hodnoty subjektu nad tuto „špičku“, a více. VR sickness „špičku“ je tedy proporcionální ku předešlým hodnotám. Lze se tedy domnívat že je pro člověka rizikovější, pokud je VR sickness vyvolané až po delší době strávené ve VR, jelikož prudce zvedne již dosti vysoké hodnoty.



**Graf 4-18: Graf subjektu s náchylností na kinetózu (VR sickness uprostřed měření)**

Většina grafů má na svém začátku nebo těsně za prostředkem prudký nárůst hodnot. Tento jev je v důsledku toho, že v daný bod měření nastala VR sickness vyvolána jízdou po hale. Pořadí aplikací se měnilo, a tak grafy se mohou v lokaci této „špičky“ lišit.



**Graf 4-19: Graf subjektu s náchylností na kinetózu (VR sickness na začátku měření)**

Prudký nástup hodnot nebo „špička“ na grafu, byla převážně pozorována u subjektů uvádějící náchylnost na kinetózu v rámci vstupního dotazníku. Tento jev nebyl vždy podmínkou, avšak byl oproti subjektům uvádějící že kinetózou netrpí pozorovatelně častější. Ať již na naměřených hodnotách zaznamenaných pomocí GSR senzorů, tak na evidentní fyzické odezvě, viditelnou nestabilitou, držením těla, tak i komentářů subjektů při jízdě po hale.

Tabulka 4-2: Tabulka průměrných hodnot  $\mu S$  v závislosti na různých kategoriích subjektů

Subjekt	Průměrná naměřená hodnota ( $\mu S$ )
<b>Pohlavní identita</b>	
Muž	3,59
Žena	2,99
<b>Věková kategorie</b>	
<25 let	2,97
25–39 let	4,99
40–65 let	2,45
> 65 let	2,30
<b>Průměrný denní čas u videoher</b>	
<1 hodina	3,67
1–3 hodiny	2,45
4–6 hodin	2,75
<b>Předešlá zkušenost s VR</b>	
Ano	3,62
Ne	2,96
<b>Náchylnost na kinetózu</b>	
Ano	3,85
Ne	2,99

Muži během měření vykazovali vyšší průměrné hodnoty  $\mu S$  oproti ženám. Tento jev může být přiřazován fyzickým rozdílům mezi muži a ženami. Počáteční domněnka že muži se potí více oproti ženám, a tudíž jsou hodnoty vyšší, se neukázala zcela spolehlivá, a studie spíše přiřazuje vyšší hodnoty pocení ke vzrůstu těla. Můžeme se tedy domnívat že měření muži, byli průměrně vzrostlejší oproti ženám, a tudíž silnější pocení jejich vzrostlejších těl vedlo k vyšším naměřeným hodnotám. [89]

Podobně jako u naměřených hodnot TS v rámci dotazníku SSQ, vykazuje věková kategorie také značné rozdíly v naměřených hodnotách  $\mu S$ , kde se jako dominantní opět ukazuje věková kategorie 25 až 39 let. Na druhém místě je věková kategorie pod 25 let, následovaná kategorií 40 až 65 let a poté subjekty nad 65 let. Zde lze poukázat na jev, že s přibývajícím věkem je snížena funkce potních žláz, nebo že v mladších jedincích nemusí být ještě zcela vyvinuté. Vysvětlující naměřené hodnoty. [90]

Delší průměrný denní čas strávený u videoher evidentně dopomáhá pro zmírnění dopadů VR sickness. Nutno brát v úvahu poslední kategorii 4 až 6 hodin, kde subjektů bylo méně oproti ostatním kategoriím, a jednalo se spíše o mladší jedince. Je zde tedy možné že ačkoliv očividně jejich hodnoty jsou nižší oproti kategorii méně než 1 hodina, stále mají malinko větší hodnoty než kategorie 1 až 3 hodiny. [6], [12]

Subjekty s předešlou zkušeností s VR dosáhly větších hodnot oproti těm, kteří tuto čest předtím neměli. Lze teoretizovat že větší hodnoty  $\mu S$  u jedinců, co zkušenost s VR mají, může kombinace jiných vlastností těchto jedinců, které převážily výsledné hodnoty. Příčinu lze však vysvětlit také tím, že zkušené subjekty většinou vykazovali touhu předvést co nejlepší výkon a čas oproti předešlým subjektům. Kompetitivní nálada mohla vyústit ve větší nervozitu subjektů. Nervozita, a tudíž vysoké hodnoty  $\mu S$  mohli také být ovlivněni frustrací zkušených subjektů vlivem pro ně ubíjejícího čekáním na konec audio instruktáže, než mohou opět pokračovat v montážním úkolu, a být co nejdříve hotoví.

V poslední řadě, subjekty náchylní na kinetózu dosáhli vyšších hodnot oproti těm, kteří náchylní nejsou. Rozdíly ve fyzických reakcích na VR sickness, podobou grafů, naměřených hodnotách, podporují toto zjištění a shodují se s předešlými studiemi. [8], [10], [12]



#### 4.5.5 Časová analýza měření

Průměrná doba, za kterou subjekt dokončil celý proces měření byl zhruba 10 minut a 6 vteřin. Z toho byl čistý čas strávený subjekty v obou aplikacích průměrně 7 minut a 33 vteřin.

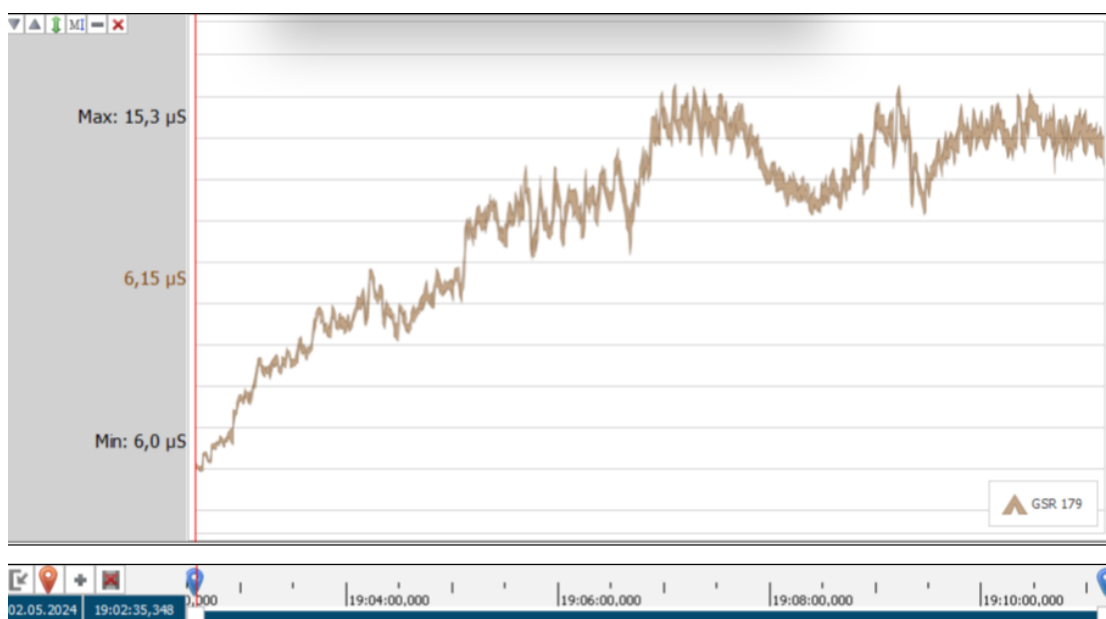
Analýza časů subjektů u jednotlivých aplikací dospěla k výsledku, že průměrný čas pro dokončení standardní VR montážní aplikace, byl 3 minuty a 55 sekund. Zatímco průměrný čistý čas pro dokončení modifikované VR montážní aplikace, byl 3 minuty a 38 sekund. Tento jev je možno vysvětlit skutečností, že pořadí aplikací nebylo vždy stejné, a že zvolené pořadí nebylo rovnoměrně vyvážené. U 19 subjektů byla první aplikací standardní VR montážní aplikace, a u 13 subjektů byla první aplikací modifikovaná VR montážní aplikace. Více subjektů tudíž měli pomalejší časy u standardní VR montážní aplikace z důvodu jejich dosavadní ne zkušenosti s procesem, a vedli si tudíž lépe na druhý pokus u modifikované VR montážní aplikace. Vyvolání VR sickness nebylo dostatečné, aby zabránilo subjektům a jejich nově získané zkušenosti v dosažení lepšího času než u předešlého pokusu.

Absolutně ve všech případech byla varianta aplikace, která byla prováděna subjektem jako první, pomalejší oproti druhé aplikaci. Tento jev je přiřazována skutečnosti, že montážní proces obou aplikací je zcela totožný. Subjekt tudíž nabral zkušenosti s ovládním, a je již seznámený s celým procesem natolik, aby dosáhl lepšího času.

Nelze tedy jednoznačně konstatovat že během měření představovala VR sickness značnou překážku pro splnění úkolu, nebo že byla velkým faktorem pro vytvoření značného rozdílu v čase dokončení aplikace. Nehledě na to, zda byla VR sickness indukována na začátku nebo uprostřed měření daného subjektu. Předešlá zkušenost s procesem tedy značně převažovala faktor VR sickness v otázce, jaká z aplikací bude rychleji splněna.

30 z 32 subjektů ukončilo měření s vyššími hodnotami  $\mu S$  (Microsiemens), než když začali. Většina subjektů s přibývajícím časem měření vykazovala stálý nárůst hodnot  $\mu S$ , naměřené za pomoci GSR senzorů. Úkaz, který se shoduje se zjištěním předešlými studiemi [4], [8], [12]

Stále stoupající hodnoty během měření odpovídají na otázku, proč je doporučované limitovat dobu strávenou ve VR na menší úseky (cca 30–45 minut), pokud vezmeme v potaz, že průměrný čas měření jednoho subjektu byl pouhých 10 minut a 6 sekund, a stačil pro dosažení znatelných rozdílů v naměřených hodnotách. [8]



Graf 4-20: Typický scénář fluktuujících, avšak konstantně narůstajících hodnot  $\mu S$  v čase



**Tabulka 4-3: Tabulka průměrných časů v závislosti na různých kategoriích subjektů**

Subjekt	Průměrný celkový čas	Průměrný čistý čas VR sickness aplikace	Průměrný čas standardní aplikace
<b>Pohlaví identita subjektu</b>			
<b>Muž</b>	0:07:00	0:03:31	0:03:30
<b>Žena</b>	0:08:10	0:03:46	0:04:24
<b>Věková kategorie</b>			
<b>&lt;25 let</b>	0:07:24	0:03:40	0:03:44
<b>25–39 let</b>	0:06:41	0:03:24	0:03:17
<b>40–35 let</b>	0:08:13	0:03:46	0:04:27
<b>&gt; 65 let</b>	0:08:01	0:03:34	0:04:27
<b>Průměrný denní čas u videoher</b>			
<b>&lt;1 hodina</b>	0:07:47	0:03:39	0:04:08
<b>1–3 hodiny</b>	0:07:11	0:03:40	0:03:31
<b>4–6 hodin</b>	0:06:27	0:03:14	0:03:13
<b>Předešlá zkušenost s VR</b>			
<b>Ano</b>	0:06:58	0:03:31	0:03:27
<b>Ne</b>	0:08:12	0:03:46	0:04:27
<b>Náchylnost na kinetózu</b>			
<b>Ano</b>	0:07:08	0:03:30	0:03:38
<b>Ne</b>	0:07:48	0:03:43	0:04:05

Časy mužů byli nižší oproti časů žen. Možno se zde domnívat, že většina měřených žen neměla předešlé zkušenosti s VR oproti většině měřených mužů. Nebo že žádná z žen neměla předešlé zkušenosti s montážním procesem či podobným úkolem, zatímco muži v několika případech měli. Tyto faktory mohli vyústit ve značné rozdíly v čase.

Časová analýza ukázala že věková kategorie 25 až 39 let byla nejrychlejší v čase dokončení aplikací. Důvodem může být kombinace relativně mladého věku subjektu oproti starším generacím, avšak dostatečné vspělosti, času pro lepší chápání VR technologie a řešení úkolů, oproti mladším generacím. Druhou nejrychlejší byla věková kategorie pod 25 let, která oproti starším generacím má v dnešní době lepší příležitost se setkat s VR technologií. Věková kategorie 40 až 65 let si vedla ze všech nejpomaleji, ale je nutno vzít v potaz že nejstarší věková kategorie čítá pouze jeden subjekt, zatímco kategorie 40 až 65 let čítá 13 subjektů.

Subjekty hrající videohry častěji, dosáhli lepších časů oproti těm, co u videoher tráví času méně nebo vůbec. Důvody lze vysvětlit tak, že subjekty měly menší problémy pochytit/identifikovat jednotlivé technické aspekty aplikací, porozumět jejich interní funkcionalitě a nasazení adekvátní strategie pro správný postup aplikacemi bez zbytečné ztráty času.

Subjekty, které měli již v minulosti potyčky s VR, dosáhli lepších časů oproti těm, kteří tu čest neměli. Subjekty se dokázali lépe přizpůsobit pocitu ve VR, a lépe se v tomto prostředí díky zkušenosti orientovat. Nadále dokázali lépe pochopit, jak správně jednotlivé objekty uchopit a manipulovat s nimi tak, aby byl pokus registrován aplikací jako úspěšný.

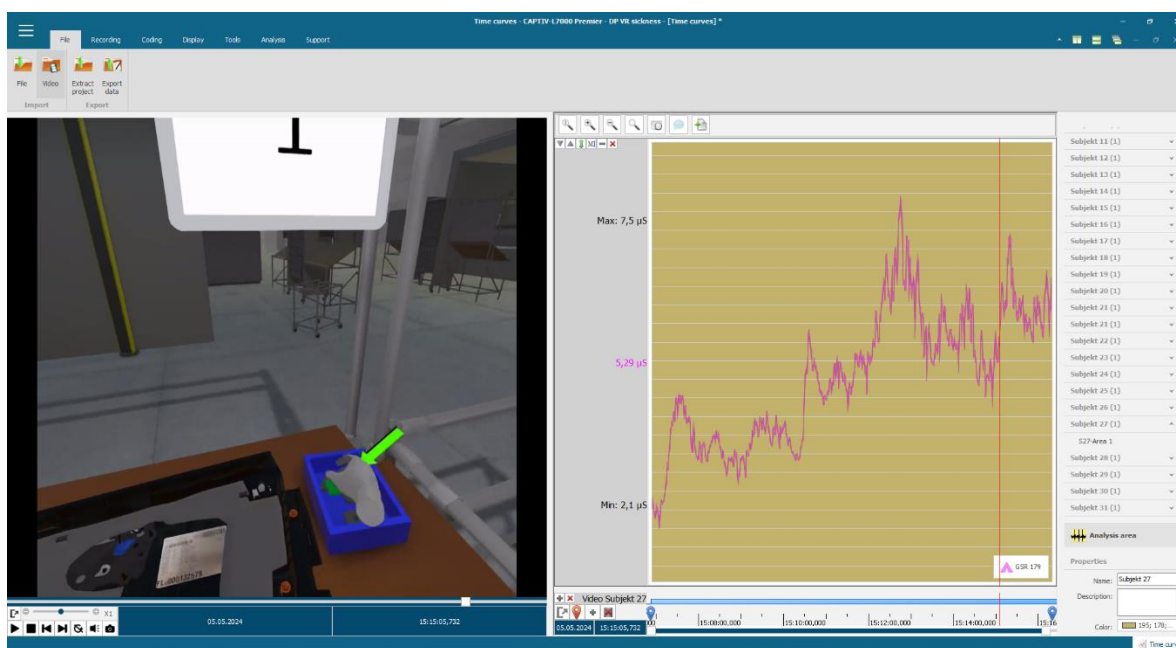
Subjekty bez náchylnosti na kinetózu dosáhli průměrně pomalejších časů oproti těm, co tuto náchylnost mají. Jak bylo zmíněno, reakce na kinetózu byla silná, avšak krátkodobá. Všechny subjekty po skončení jízdy čekala vždy počáteční audio instruktáž před začátkem montáže, která postačila subjektům ke vzpamatování se z VR sickness. Avšak tento jev si zasloužil více pozornosti. Po bližším studování dat bylo zjištěno že kategorie subjektů nemajících sklony ke kinetóze je početnější, a zároveň měla více subjektů kteří nemají předešlou zkušenost s VR. U mnoha subjektů se tedy našly vysoké individuální časy, sahající někdy nad hranici 5 minut až po 8 a půl minuty na jednu aplikaci, kde každý svou troškou přispěli k těmto vyšším průměrným hodnotám. Na druhou stranu, kategorie s náchylností na kinetózu měla více subjektů, co se již s VR předtím setkaly, a žádný ze subjektů nepřekročil hranici 5 minut na jednu aplikaci. Je tudíž domněváno že v časovém rozdílu tedy nenesla náchylnost na kinetózu silnou váhu, oproti spíše jiným z vlastností subjektů.

#### 4.5.6 Vliv VR sickness na úspěšnost subjektů a jasnost instrukcí

Tlačítko pro opakování audio instrukcí bylo během celého procesu měření všech subjektů, stisknuto 10x. Takto nízké číslo v porovnání s počtem subjektů (32), je vysvětlováno tím, že aplikace byli dostatečně názorné ve své instruktáži a vizuálním ukazatelům, pro takto drastické snížení potřeby o nápovědu. Z těchto 10 stisknutí, bylo tlačítko stisknuto 7x v případě standardní VR montážní aplikace, a 3x v rámci modifikované VR montážní aplikace. Lze se zde opět domnívat, že tento jev je v důsledku toho, že více subjektů začínalo se standardní VR montážní aplikací jakožto první aplikací.

Z pozorování záznamů z měření, a hodnot z GSR senzorů, bylo vidět že VR sickness způsobila ve většině subjektů pozorovatelné vzrušení během doby svého trvání. Tato skutečnost byla často potvrzena také nevyžádanými komentáři subjektů během jízdy, tak i po jejím skončení. Avšak toto vzrušení rychle opadlo po skončení jízdy vyvolávající VR sickness. Po dokončení jízdy se naměřené hodnoty u subjektů opět stabilizovaly. Avšak ve většině případů hodnoty zůstali ve vyšší průměrné hodnotě než před vystavením VR sickness. Zde je možné se domnívat že v jedinci je stále zachován stav zvýšené pozornosti nebo rozrušení z předešlého vystavení VR sickness, kombinovaném s vlivem času stráveném ve VR, který byl popsán v předešlém bodě.

Toto nakonec však nezabránilo subjektům v úspěšném dokončení obou aplikací.



Obrázek 4-17: Nárůst hodnot subjektu v důsledku frustrace

Prezence dalších významných nárůstů a poklesů hodnot, byli detekovány v případech, kdy byla dokončena audio instruktáž, a subjekt nyní byl přenechán, aby vykonal, co bylo po nich požádáno. Subjekty mohli být poté buď zmatení, a hledali po pracovišti co mají přesně dělat, nebo se frustrovali nad svými nezdařenými pokusy uchytit nebo dosáhnout na objekt. Po dokončení kroku, nastal pro subjekt moment oddechu a také viditelný pokles hodnot. Tento jev nebyl však podmínkou pro všechny subjekty, nebo pro všechny jejich úkoly v rámci montáže.

Zkušené nebo klidné subjekty se neselekali se znatelnou frustrací během montážního procesu, a nevykazovali mnoho prudkých nárůstů hodnot, kromě začátku VR sickness vyvolávající jízdy po hale. Subjekty se nestresovaly a nezmatkovaly, a tudíž jejich průběh hodnot byl plynulejší, a nebyli zaznamenány podobné prudké nárůsty hodnot nebo „špičky“.

#### 4.5.7 Problémy a limitace měření

Vzhledem k identické podobě, dostatečné názornosti a srozumitelnosti instrukcí jednotlivých aplikací během montážního procesu, nebylo možné jednoznačně prokázat, že by VR sickness měla značný vliv na zapamatování či jasnost instrukcí.

Subjekty bez předešlé zkušenosti s VR v několika případech vyžadovali pomoc s dokončením daného montážního kroku. Instrukce jim byli jasné, avšak měli často problém správně uchytit daný objekt. Subjekty se v těchto případech často snažily uchopit objekt z velké dálky, ačkoliv si mysleli, že sahají přímo na něj. Většinou se také snažily uchopit objekt „špatným způsobem“, který program nedokázal zaregistrovat jako dotek, z důvodu neprotínajících se hit boxů ruky a objektu. Tato skutečnost u několika subjektů vyústil ve zbytečnou ztrátu času.

Bylo použito přístupu náhodného přiřazování pořadí aplikací subjektům. Je domněváno, že nerovnoměrné rozložení pořadí, která z aplikací je první (19–13), se podepsala na časech jednotlivých aplikací. Čas VR sickness aplikace se tedy jeví jako rychlejší, z důvodu že byla častěji jakožto druhou aplikací v pořadí. Subjekty tudíž měli předešlou zkušenost z aplikace předchozí, a VR sickness nepředstavovala faktor, který by dostatečně zpomalil tempo subjektů. Tato skutečnost se však také může brát sama o sobě jakožto další zjištění, které si však zaslouží své vlastní budoucí pozorování.

Bylo obtížné najít a zapojit do měření subjekty ve věkové kategorii 65 a starší. Z oslovených jedinců splňující toto kritérium, většina odmítla z různých zdravotních důvodů, nebo obav/strachu z VR technologie a její případné následky. Nelze tedy přiřazovat výsledkům měření jednoho subjektu ve věkové kategorii nad 65 let přílišnou váhu.

Administrace dotazníků SSQ a NASA TLX subjektům, byla až na samotném konci měření, namísto průběžné administrace vícero dotazníků jednomu subjektu, a porovnávání výsledků před a po expozici VR sickness. Názory na tuto praktiku se liší, avšak oba způsoby jsou shledávány za validní. [88]

Volba druhé metodiky administrace dotazníků mohla hrát roli ve výsledcích měření a mohla teoreticky přinést více poznatků z většího objemu dat.

## 5 Navrhovaná řešení VR sickness

Pro nalezení řešení jevu VR sickness jsou nám oporou předešlá zjištění z předchozích studií, tak získaná data z provedeného měření v rámci této diplomové práce. Měření dopomohlo nejen k utvrzení předešlých tvrzení nebo nikoliv, ale také k poskytnutí půdy pro zamyšlení se nad možnými způsoby řešení problematiky VR sickness.

Jednotlivé návrhy se zaměřují na afirmaci a brání v potaz současně existující způsoby, data, a praktiky. Nadále také zvažují teoreticky možná východiska u VR sickness a současných VR systémů. Způsoby prevence a snížení dopadu VR sickness již využívané, v současně době proveditelné, ale také teoreticky možné způsoby, které však zatím jsou kvůli limitacím současné technologie, nebo chápání VR sickness ne zcela realizovatelné. Nutno dodat že, v rámci této diplomové práce není prováděna žádná studie proveditelnosti nebo pokusy o realizaci zmíněných teoretických řešení. Pokud by však bylo řešení tohoto problému nalezeno díky novým technologiím nebo poznatkům, je teoretizováno, že by se tímto přispělo k dalšímu způsobu zmírnění výskytu nebo závažnosti VR sickness.

### 5.1 Adaptační na VR sickness

Zdaleka nejdoporučovanější praktikou na předcházení pocitu nevolnosti dle předešlých studií zabírající se tematikou VR sickness nebo motion sickness, je postupné přivyknutí si na daný jev. Předešlé výzkumy a studie prokázali, že vystavováním se situaci způsobující motion sickness/VR sickness, a postupně zvyšovat svoji odolnost vůči tomuto jevu, se jeví jako jeden z nejefektivnějších způsobů, jakými motion sickness nebo VR sickness předcházet. Nebo jak zmírnit/mitigovat jejich dopady. [4], [6], [8], [10], [12], [15]

Měření v rámci kapitoly 4 zahrnovalo subjekty kteří mají i nemají sklony ke kinetóze. Výsledky měření ukázali že jedinci, kteří nejsou náchylní na kinetózu, mají skoro dvojnásobně nižší hodnoty TS a nižší a plynulejší průběh hodnot  $\mu S$  naměřených pomocí GSR senzorů.

Uživatel se může začít přizpůsobovat pohybu ve VR pomocí teleportační způsobu přemístování, a otáčením se ve virtuálním prostředí za pomoci analogové páčky na ovladači/periferním zařízení. Později až si uživatel zvykne, může přejít na plynulý pohyb za pomoci analogové páčky na ovladači, a otáčení se pomocí celého svého těla.

Nadále lze dodatečně mitigovat pocit nevolnosti tím, že jedinci budou ovládat VR v sedě, namísto ve stoje.

V neposlední řadě je zde také možnost začít se aklimatizovat s virtuálním světem skrze aplikace, které nevyžadují po uživateli pohyb prostorem. Jsou jimi aplikace jako například klasické montážní simulátory pracoviště, kabinové letecké simulátory, simulátory řízení, vaření v kuchyni, a mnoho dalších obdobných aplikací výukové či zábavní národy, kde je uživateli po většinu času omezen pohyb pouze v rámci malého prostoru.

Předešlé studie poukazují že jedním ze způsobů adaptace je také častější jízda autem, hraní videoher nebo předešlá zkušenost s VR [4], [6], [12], [15].

V rámci měření bylo zkoumáno, jaký dopad klade VR sickness na člověka, který častěji hraje videohry, nebo již měl zkušenosti s VR. V obou těchto případech byli hodnoty TS v rámci SSQ u těchto jedinců nižší. Nadále obě kategorie měli rychlejší časy. Průměrné hodnoty  $\mu S$  naměřené pomocí GSR senzorů byli nižší jen u těch co častěji hrají videohry. Subjekty věděli, jak program přibližně funguje a zachovali klid. Avšak subjekty se zkušeností s VR zaznamenali hodnoty vyšší. Lze se domnívat že tento jev je spojený s nervozitou a frustrací nad trivialitou úkolu od zkušených subjektů. Nebo také nervozita zkušených subjektů, beroucí měření jako kompetitivní výzvu, a snažení se o nejlepší čas/výkon.

## 5.2 Ergonomie, provedení a funkce VR HMD

### Snížení váhy VR HMD

Některé předešlé výzkumy uvádí že váha HMD hraje značnou roli nejen na uživatelský komfort, který také může přispívat k VR sickness.[4].

Nabízí se tedy řešení z hlediska nalezení způsobu, jakými co nejvíce odlehčit VR HMD. Ať již z hlediska přenesení těžiště převážně z přední části headsetu na rovnoměrné zatížení po celém obvodu hlavy. Zamyslet se nad odebrání nepotřebných částí, nebo využíváním jiných lehčích materiálů/slitin. Ideálním stavem by zde byl případ Microsoft HoloLens, který se však řadí do kategorie MR a nikoliv VR. Pokud by se však dokázal najít způsob jakým minimalizovat VR HMD headsety do podobné podoby, a odlehčit tímto zátěž na hlavě člověka, dosáhlo by se tímto ideálnějšího stavu z hlediska váhy zařízení.

### Senzory

Existence chytrých hodinek nám dokázala, že je možné mít senzor srdečního tepu vždy na ruce. VR headsety již své senzory mají také. Například senzory snímající okolí zevnitř brýlí ven (Inside-out tracking). Současné VR HMD mohou mít také senzory uvnitř hledí, sledující, zdali je HMD správně nasazeno na hlavě člověka jako v případě Meta Quest 2. Využitím senzorů, specializovaných na monitorování fyzického stavu člověka, se jeví jako jedno z možných řešení.

### GSR a podobné senzory ve VR HMD

Prezence dalších senzorů, konkrétně GSR senzorů ve VR HMD, které by byli ve styku s kůží člověka, by dokázali monitorovat potenciální VR sickness v člověku v reálném čase. V závislosti na naměřených hodnotách, by mohlo VR spustit bezpečnostní opatření které by člověka dokázalo z tohoto stavu vyvodit. Opatření jako například aktivní pauza nebo výzva pro sundání brýlí, následovaná statických obrazem a relaxační hudbou.

GSR senzory se během měření ukázali jakožto relativně spolehlivá metoda měření VR sickness v jedinci. VR sickness vyvolávající element se projevil významným nárůstem hodnot, a tudíž by senzor mohl tento prudký nárůst hodnot detekovat jako potenciální hrozbu, a učinit preventivní opatření. Jelikož měření ukázalo že ve většině subjektů, naměřené hodnoty postupem času stoupali, můžou GSR senzory také sloužit jako prvek který uživateli sdělí, že jejich čas strávený ve VR je moc dlouhý. Jedinec by byl tedy vyzván programem, aby zvážil přestávku a na chvíli opustil virtuální prostor.

GSR senzory použité během měření, vyžadují malou kontrolní jednotku a dva malé snímače umístěné na ruku uživatel. GSR senzory by se však dali umístit do rámu VR HMD, který je přitisknutý na obličej uživatele. V současné době také pozorujeme existenci VR periferních zařízení, jakožto ovladač koncipovaný jako rukavice. [85]

Tyto rukavice na koncích svých prstů mohli být opatřeny GSR senzory, a řídicí jednotka osazena na, nebo všitá přímo do rukavic. Rukavice by mohli nadále dosahovat až k zápěstím člověka, kde by mohl jiný senzor monitorovat srdeční tep jedince a upozorňovat na případně výkyvy. Nadále také možné najít způsob implementace systému měření kortizolu a dalších veličin které byli již dříve zjištěny že indikují pravděpodobný nástup/riziko kontrakce VR sickness. [5], [6], [10], [12]

### **Opatření VR HMD o vnější kameru**

Pokud je VR HMD opatřen kamerou vepředu hledí jako například Meta Quest 2 a 3, můžou brýle promítnout člověku současný obraz skutečného světa kolem nich, a navrátit je a jejich smysly krátkodobě do reality, dokud se jejich stav nezlepší a neorientují se. Tento systém by se mohl nadále využít jako varování v případě, kdyby hrozila srážka nositele VR HMD s objektem ve skutečném světě, vlivem jejich nepozornosti. Tento systém se dnes již využívá, pokud uživatel vykračuje z vyznačené zóny pro VR. Stejná technika by se použila, pokud by bylo VR opatřeno GSR senzory, které by po překročení určité hodnoty tímto přenesly uživatele zpět do reality z důvodu jejich bezpečnosti.

### **Nestereoskopické technologie zobrazování**

Stereoskopické obrazovky, bohatě využívané u současných VR systémů, představují jednu z významných položek, které přispívají k VR sickness. Avšak současné VR technologie si na tomto provedení zakládají. Nelze jen tak opustit imerzi které přináší oddělené pohledy a snímací úhly VR světa pro každé oko. V současné době monoskopické VR existuje v podobě 360° videa, které je možno sledovat z klasických 2D počítačových nebo mobilních obrazovek. [82]

Doposud však nebyla vedena dostatečná pozornost nebo úsilí pro implementaci této technologie do VR HMD, na úkor ztrát pocitu imerze a hloubky které by monoskopické obrazovky přinesly. [82]

Jako budoucí kandidáti na inovaci na poli zobrazování ve VR se jeví varifokální čočky, které dovedou očím realističtější požitok z hloubky pohledu (Depth of field), díky umožnění realističtějšího zaostřování. [83]

Nadále se technologie jako lightfield display, rozdělující výsledný obraz v úhlech paprskovitě/radiálně narozdíl od volumetrických obrazovek rozdělující obraz plošně. [84]

O tom, zdali tyto nestupující technologie pomohou s vergence-accommodation conflict a umožní nové možnosti koncipování VR HMD, to ukáže však až čas a další potřebné budoucí výzkumy.

## **Haptická odezva a vícesmyslová stimulace**

Z nálezů předešlých studií vyplývá, že inkluze více lidských smyslů ve virtuálním prostředí, dopomáhá nejen k imerzi, ale také zmírňuje konflikt smyslů, který přispívá k potenciálnímu nárůstu VR sickness [4]

Doprovázení vizuální informace adekvátní audio odezvou, nebo třeba sluchová stimulace klidnou hudbou při VR sickness pomáhá také. [6], [34]

Pokud bychom brali tedy v potaz, že vícesmyslová stimulace pomáhá při konfliktu smyslů, je tudíž zapotřebí docílit co největšího ponoření uživatele ve VR světě, stimulováním co největším množstvím jeho smyslů, a přenést je tak plně do virtuální reality.

V současné době VR HMD systémy disponují vizuální a audio složkou, avšak v současné době je stále opomíjena haptická odezva a pocit doteku a interakce s virtuálními objekty.

V této sféře již v současné době nalezneme možnost periferních zařízení pro VR v podobě rukavic, které haptickou odezvou disponují. Člověk je tak schopen díky rukavicím pociťovat dotek při interakci s virtuálními objekty. [85]

Existují také obleky/vesty, umožňující totéž. Toto periferní zařízení je osazené na torzo člověka a taktéž dovede registrovat a simulovat dotek či náraz virtuálních objektů s hrudí, břichem, boky, nebo zády uživatele. Využíváno je převážně pro registrování a simulování zásahu kulkou u VR videoherních stříleček. [86]

Využití více technologií umožňující dodatečné hloubky imerze a odloučení se od skutečného světa, by mohlo být díky těmto technologiím snazší. Mohlo by pomoci při konfliktu smyslů, které by nyní byli více, než kdy dříve naladěny/převažovaly do VR světa, namísto jejich stálého povědomí o skutečném světě.



### 5.3 Standardy pro vývoj VR softwaru a design prostředí

Vzhledem a nátuře VR sickness, by existence standardu pro vývojáře a designéry virtuálních světů, mohla vést ke svědomitějšímu a opatrnějšímu designování, a být jedním z východisek, v předcházení VR sickness. To, a také obecné šíření informací, jak tvořit bezpečné virtuální prostředí, které nebude způsobovat VR sickness.

#### Rest frame

Jedna z praktik by byla implementace rest frame do VR prostředí. Bod, pokud možno statický, od kterého se lze navigovat nebo „odrazit“. Dopomoci tímto v rozlišování relativního pohybu jednotlivých virtuálních objektů a usnadňující uživateli orientaci. Jedna z těchto praktik by zahrnovala buď inkluzi virtuálního nosu nebo jeho jiné důvtipné obdoby v dané aplikaci. Nadále se prezentuje řešení v podobě toho, že celý virtuální svět je designován, aby se uživatel vždy mohl zorientovat pomocí rest frame, který je přítomen takřka na každém zákoutí virtuálního prostředí, jako například hora v pozadí. [12], [20]

#### Kontrola

Náhlé nekontrolovatelné pohyby s uživatelem se již ukázali jako značný faktor přispívající VR sickness. [4], [8], [12]

Během realizovaného měření, bylo vidět znatelnou frustraci subjektů nad neschopností kontrolovat nízkozdvíhový vozík, a raději by chtěli vozík ovládat sami pro uzpůsobení jízdy svému vlastnímu tempu nebo v něm vůbec nebyli. Nekontrolovatelná jízda byla hlavní příčinou prudkého nárůstu hodnot  $\mu S$ , které signalizovali prezenci VR sickness

Bylo by proto vhodné omezit potřebu nekontrolovatelného typu přesunu uživatele na minimum. Alternativně uživatele přemístit stylem teleportace nebo jiným způsobem, který nezahltí uživatele přílišným vizuálním rozruchem a nenaruší jejich rovnováhu.

#### 6DOF a limitace pohybových možností

Mezi další zásady pro tvoření VR aplikací je nutno zmínit, že uživatel by měl mít kontrolu nad svým vlastním pohybem, pohledem, lokací v co největším množství. Větší svoboda pohybu dopomáhá k větší imerzi. Avšak je doporučované dodržování realističnosti pohybu, a to v takové míře, která nevyústí v konflikt smyslů. [4], [5], [12], [52]

Dovolovat tudíž jen určité množství volnosti pohybu uživateli, které je srovnatelné s tím, kterých je konkrétně schopný vykonávat, nebo očekávat. Dovolit uživateli se rozhlížet, a pohybovat se po všech osách, avšak omezení možnosti pohybu na vertikální ose. Zamezit tak například možnosti létání prostorem inkluzí gravitace, avšak umožnit uživateli se pohybovat vertikálně v omezeném množství například formou skoku.

#### Varování

Pokud se nelze vyhnout přítomnosti některých situací nebo elementů způsobujících VR sickness, bylo by vhodné uživatele varovat předem že tato situace může nastat. Podobně jako když před začátkem filmu nebo videohry, je člověk varován před fotosenzitivitou nebo epilepsií, pokud se ve scéně budou vyskytovat silná/blikající světla.

## Výzva k přizpůsobení brýlí a zobrazení

VR aplikace nebo samotný VR systém by mohl při svém spuštění vyzvat uživatele na upravení parametrů VR HMD tak, aby odpovídali jejich potřebám. Systém by také mohl detekovat optimální konfiguraci pro daného uživatele automaticky a přizpůsobit se sám. Přizpůsobení faktorů jako FOV, IPD, Depth of field a zorná vzdálenost jsou individuální pro každého uživatele. Špatná konfigurace může vyústit k VR sickness. [4], [12], [15], [16], [34]

Během měření, mnoho subjektů často zápolilo s počátečním přizpůsobováním VR headsetu jejich vlastním potřebám a velikosti jejich hlavy. Špatné nasazení vedlo k rozmazanému obrazu nebo nepohodlí

## Adekvátní HW a SW

Při vývoji VR HMD systémů je nutné zajistit dostatečně výkonný hardware pro současné potřeby, a optimalizovaný software pro zajištění vysoké latence. Nadále je také dbát na vysoké hodnoty obnovovací frekvence ve VR systémech. Nízkou latenci nebo obnovovací frekvenci dokáží lidé registrovat, a může u nich nastat neshoda mezi očima a vnitřním uchem a následné vyvolání VR sickness. [4], [10], [12], [15], [16], [34]

## 5.4 Uzpůsobení skutečného prostředí a podmínek pro VR

Obecně se hovoří o provozování VR aktivit v adekvátní, dostatečně prostorném a prázdném prostředí, s přísunem čerstvého vzduchu za příznivé pokojové teploty.

VR setup by měl být opatřen dostatečně velkým prostorem, velkým minimálně 2x2 metry či více, pro zajištění volného prostoru pro nenarušený pohyb alespoň ze stacionární pozice. Doporučuje se však co největší dostupný prostor, který je k dispozici, pro umožnění bezpečného pohybu až chůze v prostoru. Zmíněný prostor by neměl obsahovat překážky, pohozené věci, a jiné objekty do kterých by mohl člověk praštit, narazit, zavadit o ně, či na ně šlápnout nebo o ně zakopnout.

Prostor by neměl být dusný, nebo prašný pro zajištění zdravých podmínek pro dýchání. Nadále by měl prostor být dostatečně osvětlený přirozeným nebo umělým osvětlením pro správnou funkčnost snímacích senzorů VR.

Dalším z důvtipných řešení může představovat prezence větráku. Větrák foukající vzduch směrem na uživatele ve VR, může zajistit mnohé benefity. Přísunu čerstvého vzduchu a chladících vlastností, které pomohou při pocení, které se u VR aktivit může vyskytovat ve zvýšené míře oproti typickým počítačovým aktivitám. Avšak vzduch proudící z větráku má také orientační vlastnost, a to sice že dává uživateli pocitově neustále vědět o tom, kde se relativně vůči proudu vzduchu z větráku nachází ve skutečném světě.

## **5.5 Etika užívání VR**

### **Výživa a stav těla jedince**

Je doporučováno zajistit dostatečnou hydrataci a výživu těla před začátkem VR aktivit. Dehydratovaný nebo hladový člověk může být podrážděný nebo unavený, a tudíž zranitelnější vůči VR sickness.

### **Obeznamení uživatele s obecnými a jejich vlastními limity**

Člověk by měl být obeznámen s obecnými limity běžného uživatele VR, a následně si uvědomit a zhodnotit své vlastní limity. Dodržovat obecné pravidlo doporučených 30 až 45 minut užívání VR, před návratem do reality, a patřičným odpočinkem pro tělo a srovnání smyslů. V závislosti na svém aktuálním stavu pak uzpůsobovat svůj čas a aktivity ve VR prostředí, obzvláště v takových situacích, kde hrozí riziko VR sickness.

### **Způsob užívání a pohybu**

Používat VR v sedavé pozici, pokud uživatel nezvládá z jednoho či více důvodů užívání VR ve stoje. To samé platí se stylem ovládní, navigace a pohybu ve VR. Tudíž začít na teleportačním způsobu přemísťování a snap turning. Po navyknutí si na tento styl pohybu ve VR, se může uživatel začít přizpůsobovat na otáčení se celým tělem a plynulým pohybem za pomoci analogového joysticku.

### **Znalost vlastní náchylnosti na VR sickness nebo kinetózu**

Pokud člověk má historii s kinetózou, je vhodné být opatrný při užívání VR, a případně být připraven z VR rychle v případě VR sickness vystoupit. Nadále by bylo vhodné mít po ruce volně dostupné prášky proti cestovní nevolnosti jako Kinedryl, H1-antihistamin nebo Skopolamin pro případné potřeby léčby VR sickness. Alternativou může být také zázvor/zázvorový čaj. Avšak dbát na to že efekty se mohou u každého člověka lišit.

## 6 Zhodnocení a limitace

V rámci finálové kapitoly jsou stručně shrnuty relevantní informace obsažené v rámci diplomové práce. Jsou nastolena doporučení a směrníky které mohou vést ke zlepšení současné situace s problematikou VR sickness a teoreticky nejprínosnější řešení. Kapitola v poslední řadě uvádí limitace diplomové práce.

### 6.1 Shrnutí poznatků

Pojetí VR je v současné době primárně spojované s jejím aktuálně nejrozšířenějším představitelem, jenž je technologie VR HMD. Tato VR technologie, primárně zakládající si na stereoskopii, je stále ranná s velmi nízkou mírou standardizace jak v její HW, tak SW části. Tato technologie se ve své současné podobě setkává s jevem v podobě tzv. „VR sickness“.

VR sickness představuje jev podobný motion sickness/kinetóze, při kterém nastává pocit nevolnosti vlivem konflikt smyslů. VR sickness je poddruhem motion sickness a sdílí některé její vlastnosti, symptomy ale také způsoby její mitigace. Narozdíl od kinetózy, primárním činitelem stavu nevolnosti při užívání VR není pohyb (motion), nýbrž iluze pohybu (vection).

VR sickness je způsobována mnoha faktory jak z hlediska člověka, tak samotného VR headsetu. Závažnost a náchylnost na VR sickness je určovaná fyzickými predispozicemi jedince jako jejich věk, pohlaví, náchylnost na kinetózu. Figurují zde také technické parametry a využívané technologie VR HMD jakožto FOV, Depth of Field, IPD, obnovovací frekvence, latence, způsob ovládání, tak i princip stereoskopického zobrazování. Design VR prostředí, rest frame, kontrola nad pohybem v rámci 6DOF hrají roli při VR sickness z hlediska možností, které VR prostředí poskytuje. Silným faktorem hrající roli při náchylnost nebo závažnosti VR sickness v jedinci se ukazuje odolnost/adaptace na kinetózu nebo předešlá zkušenost s VR prostředím.

V současné době již existují praktiky pro měření a mitigaci VR sickness. Ať jsou jimi preventivní opatření VR systému samotného, nebo doporučení jak VR technologii a zážitek který poskytuje regulovat. VR sickness se projevuje kromě obecných symptomů spojených s nevolností a zmatením, také objektivně měřitelnými způsoby v podobě zvýšením srdečního tepu, zvýšeným hladinám kortizolu, rozšířenými zorničkami, a také změnami v elektrodermální aktivitě jedince. Pro subjektivní měření VR sickness je v současné době používán dotazník SSQ a jeho obdoby. Pro účely měření VR sickness lze však využít i jiných doplňujících informací z dotazníků jako NASA TLX nebo SUS.

Jednotlivé výše vyjmenované faktory lze využít jako směrníky pro redukci dopadu a frekvence VR sickness. Pokud však VR sickness již nastala, naskytuje se možnost její léčby v podobě návratu jedince do skutečného světa, a vyčkání jejího odeznění. Ideálně hydratovat organismus vodou nebo lépe čajem se zázvorem, dopřát klidného odpočinku a čerstvého vzduchu. V akutnějších případech lze léčit VR sickness podobně jako kinetózu v podobě podáním práškům proti cestovní nevolnosti jako Kinedryl, H1-antihistamin nebo Skopolamin.

Měření realizované v rámci diplomové práce za pomoci několika metodik měřilo různé dopady VR sickness na člověka. Bylo využito způsobů měření jako dotazníky SSQ a NASA TLX a také GSR senzory. Cílem bylo v rámci dvou aplikací, jedna z nichž vyvolává VR sickness, porovnat do jaké míry afektuje VR sickness výkon, jasnost instrukcí, výsledky, a uživatelskou pohodu.

Z výsledků měření je patrné, že VR sickness se vykazuje jakožto silný, avšak krátkodobý rozruch v jedinci. Průměrně 10 minutové měření, z něhož pouze 80 vteřin představovala nekontrolovatelná jízda po virtuální hale, stačilo pro vyvolání znatelného pocitu nevolnosti vlivem VR sickness. SSQ dotazník ukázal, že hodnoty TS byli ve většině případů mezi hodnotami sledovaných jako značné, až za 2,75násobek hodnoty sledávající symptomy jako zlé. Nejvíce subjekty zápasily s dezorientací (D), a nejsilnějšími symptomy byli vertigo, obecné nepohodlí, a nevolnost.

Ženy se v závislosti na hodnotách TS ukazují jakožto více náchylnější na VR sickness oproti mužům, jejich naměřené hodnoty  $\mu S$  byli však nižší než u mužů. Muži měli rychlejší časy dokončení aplikací oproti ženám.

V otázce věku se u hlediska hodnot TS a  $\mu S$  jako nejnáchylnější věkovou kategorií ukázali jedinci ve věku 25 až 39 let. Jedinci pod 25 let a jedinci od 40 do 65 let, měli hodnoty nižší, avšak jejich hodnoty mezi sebou byli poměrně vyrovnané. Kategorie pod 25 let měla mírně nižší hodnoty TS, a mírně vyšší hodnoty  $\mu S$  oproti kategorii 40 až 65 let. Nejnížší hodnoty TS a  $\mu S$  vykázal jedinec z věkové kategorie více než 65 let. Nejrychlejších časů pak dosahovala kategorie 25 až 39 let, následovaná jedinci pod 25 let, a pak jedincem nad 65 let. Nejpomalejší věková kategorie byla 40 až 65 let. Nelze tímto zcela jasně odpovědět, zdali mladší nebo starší jedinci jsou náchylnější na VR sickness, ačkoliv se dá říci že se data mírně přiklánějí k větší náchylnosti na VR sickness u mladších jedinců.

Jedinci, co průměrně tráví více času u videoher, se ukazují jako odolnější vůči VR sickness než ti, co hrají videohry méně nebo vůbec, a dosahují také lepších časů dokončení úkolu. Byl zde sledován plynulý pokles všech hodnot v závislosti na času stráveném hraním videoher, až s výjimkou naměřených hodnotách  $\mu S$ , které se ukázali v případě jedinců hrající hry 4 až 6 hodin denně vyšší než u těch, co pouze hrají videohry 1 až 3 hodiny denně.

Jedinci s předchozí zkušeností s VR dosáhli lepších časů, avšak dosahují větších hodnot TS a  $\mu S$  než jedinci bez předešlé zkušenosti s VR. Jeví se tak jako náchylnější na VR sickness.

U jedinců náchylných na kinetózu, se VR sickness projevuje silněji než u těch, co nejsou náchylní na kinetózu. Hodnoty TS a  $\mu S$  jsou v obou případech vyšší. Avšak jedinci s náchylností na kinetózu jsou ti, co v rámci měření dosáhli lepších časů.

Z grafů GSR senzorů, lze zjistit že naměřené hodnoty  $\mu S$  s postupem času stoupali, a dokázali s dostatečným časem překonat i hodnotu vyvolanou při vystavení VR sickness. Ukazující, jak má čas strávený ve VR dopad na jedince. GSR senzory ukázali že rozruch v organismu vlivem VR sickness je relativní vůči současnému stavu jedince, a tudíž je VR sickness nebezpečnější, pokud je nabuzena až po nějakém čase stráveném ve VR, kdy mohli hodnoty  $\mu S$  mít dostatek prostoru eskalovat.

Subjekty měli pouze malé problémy s jasností instrukcí, a pouze ve vzácných případech potřebovali pomoc opětovným přehráním audio instruktáže. Všechny subjekty úspěšně dokončily obě aplikace. Z měření je usuzováno že VR sickness se nejvíce jeví jako významný faktor při jasnosti instrukcí, nebo jako jev mající značný dopad na výkon jedince. VR sickness dokáže být po dobu svého trvání pro určitou skupinku lidí intenzivní, avšak krátkodobá eventualita.

Po odchodu od zdroje, co VR sickness vyvolal, nepředstavuje VR sickness dlouhodobé ohrožení uživatelské pohody nebo podstatný vliv na jedince.

V závislosti na získaných datech byl sestaven seznam jednotlivých existujících, tak také teoreticky proveditelných řešení. Nahlíženo je z několika úhlů a na různé veličiny figurující ve VR sickness problematice. Vyskytují se možnosti v podobě alternativních konstrukčních provedení současných VR systémů, nebo jejich doplnění o dodatečné imerzní nebo monitorovací periferie. Jsou zde uvedeny doporučené standardy pro design VR prostředí a VR SW obecně jakožto limitace pohybových os, inkluze rest frame, princip nebrání uživateli kontroly nad vlastním pohybem, a šetrné zacházení s nimi v případě nutnosti této eventuality. Je kladen důraz na uživatele, aby přizpůsobil VR zážitek svým fyzickým potřebám a zdraví, uzpůsobil prostředí pro provoz VR a jeho podmínky, a dbal na individuální nastavení VR HMD pro své vlastní potřeby. Nadále je doporučeno, aby byli uživatelé obeznámeni jak s obecnými, tak vlastními individuálními limity, kterých by se měli držet. Je tudíž nadále nastolena doporučená etika, jak by měl jedinec přistupovat a užívat VR. Jako například zajištění dostatečné výživy organismu, znalost vlastních limitů, a brání v potaz vlastní náchylnost na kinetózu.

## 6.2 Teoretická nejpřínosnější řešení

Nejefektivnějšími současnými způsoby mitigování jevu VR sickness se jeví vysoká odolnost proti kinetóze nebo postupná adaptace jedince na kinetózu nebo samotné VR prostředí. Cílem je zde zvyknutí si na konflikt smyslů, a pohyb v prostředí virtuální reality, nebo způsobující kinetózu. Lze takto učinit vystavováním se kinetóze nebo přímo virtuální realitě. Trénování svých smyslů i za pomoci hraní videoher, se jeví jako značně přínosné pro zvýšení odolnosti na VR sickness.

Je nutno zajistit dostatečně silný HW pro VR HMD. Preferováno je tudíž HMD typu tethered, připojené k dostatečně silnému počítači. Nadále zajistit optimalizaci SW a aplikací. To vše pro zajištění co nejmenší latence/doby odezvy a dostatečně vysoké snímkovací frekvence a FPS, preferovaně 144 Hz a FPS a více, pro zajištění stabilního a plynulého obrazu vedoucí k lepší imerzi uživatele.

Software nebo individuální aplikace by měli disponovat možnostmi plnohodnotného pohybu a interakce nehledě na to, zdali jedinec sedí nebo stojí. Nabízet možnosti rozhledu a pohybu ve všech osách (6DOF), i když limitované pro realističnost dané situace. Nabízet možnosti pohybu po VR prostoru, které jsou pro jedince přívětivější. Možnost navigace po VR světě pohybem a otáčením za pomoci plynulého pohybu těla. Tak také nabízet možnost teleportačního způsobu pohybu a otáčení se za pomoci analogových páček či tlačítek na periferních zařízeních.

Při designování VR zážitků, by se nemělo vyskytovat náhlé omezené uživatelské kontroly nad svým vlastním pohybem, nevyžádané prudké pohyby nebo přemísťování uživatele po VR světě. Poskytnout uživateli kontrolu nad svým pohybem v co největším procentu času. Pohyb uživatele po VR světě by měl působit co nejpřirozeněji, a nedovolovat více svobody pohybu, než je uživatel konkrétně schopen. Nadále je doporučeno, aby VR scéna vždy obsahovala rest frame pro oči, dle kterého může uživatel určit relativní pohyb pohybujících se okolních předmětů vůči nějakému statickému objektu. Z designového hlediska takto lze docílit tak, že VR scéna vždy obsahuje v dohledu určitý statický objekt sloužící jakožto zmíněný rest frame. Lze také využití inkluze virtuálního nosu nebo jiného statického obrazu zabudovaném do samotného uživatelského rozhraní, sloužící podobnému účelu.

Je doporučeno, aby ze strany jedince nastalo přizpůsobení ovládání a obsahu dle vlastních preferencí a fyzických predispozic/omezení. Úprava nastavení jako FOV, IPD, Depth of field. Nadále dbát na adekvátně rozvržené časové úseky ve VR, prokládané pauzou návratem do skutečného světa. Dopřát jedinci čas na vzpamatování, případným odpočinkem a rehydratací. Člověk dehydratovaný, hladový, vystresovaný/iritovaný, nebo mající sklony ke kinetóze by měl svůj VR zážitek omezit na kratší časové úseky a nevystavovat se situacím/aplikacím, které mají sklony pro vyvolání VR sickness.

### 6.3 Limitace

VR technologie jsou v době psaní této diplomové práce v období stálého rapidního vývoje. Nové technologie, provedení, nápady, periferie, opatření a poznatky dopomáhající k mitigaci VR sickness se mohou velmi rychle objevovat. V závislosti na uplynulém čase se doporučuje brát zvýšenou pozornost na možné rychlé stárnutí informací.

Měření v rámci diplomové práce bylo prováděno na jedincích, kteří až na několik jedinců, neměli předešlou zkušenost v průmyslovém sektoru nebo podobném zaměření. Doporučuje se brát tuto skutečnost v potaz, při aplikaci poznatků v průmyslovém sektoru nebo na již seznámených osobách s podobnou profesní zkušeností.

Měření realizované v této diplomové práci používá standardní verzi dotazníku SSQ. Jsou zde nadále použity standardních vah pro výpočet jednotlivých podsložek N, O, D, což může zkreslovat představu o závažnosti jednotlivých podsložek v rámci měření VR sickness.

Dotazník NASA TLX využívá stejných vah pro všechny své faktory. Důvodem je zde to že není bráno v potaz větší důležitosti jednoho faktoru nad druhým, jelikož měření nebylo uskutečněné pro určitý účel nebo prostředí kde hraje jeden nebo více faktorů větší roli než ostatní.

Diplomová práce za pomoci získaných dat navrhuje různá řešení problematiky VR sickness, avšak neověřuje proveditelnost jednotlivých řešení. Obzvláště zmíněných teoreticky možných nebo v současné době nerealizovatelných řešení. Jednotlivá řešení si zaslouží vlastní průzkum a jsou doporučovány studie proveditelnosti.

## Závěr

V rámci tří kapitol byla zpracována teoretická část diplomové práce zaměřující se na téma VR sickness, poskytující znalostní základnu pro praktickou část. Z důvodu rozsáhlosti a množství proměnných vstupujících do problematiky, byl brán ohled na větší hloubku či detail u určitých témata z důvodu jejich relevantnosti a důležitosti.

První kapitola nastínila historii VR, společně se současným světem virtuální reality a souvisejících pojmů, v zájmu poskytnutí dostatečného kontextu a relevantních informací jevící se jako klíčové pro porozumění tématu VR sickness. Byly představeny jednotlivé druhy VR systémů a podobných technologií. Značná pozornost byla věnována VR HMD systémům, z důvodu jejich popularity a možnostech využití v současné době. Kapitola zahrnuje navíc také přínosy a problémy které sebou technologie VR přináší.

Kapitola druhá charakterizuje VR sickness, její obecné rysy, symptomy a faktory, hrající u tohoto jevu roli. Detailněji zpracovanou podkapitolou je zde kapitola faktorů ovlivňující VR sickness. Je zde pojednáváno jak o individuálních predispozicích člověka, tak také o vlastnostech technologie a VR prostředí. Byl poskytnut přehled o jednotlivých druzích sickness, a jak jsou spojené nebo odlišné od VR Sickness. V rámci druhé kapitoly lze také nalézt dodatečné informace úzce spojené s kapitolou třetí.

V navazující třetí kapitole byla provedena analýza a rešerše předešlých studií a zdrojů, ze kterých bylo sestaveno dosavadní chápání problematiky VR sickness, a současné prostředky pro její mitigaci, prevenci, a případné léčbě. V poslední řadě byly také listovány způsoby, jakými lze VR sickness měřit ať již subjektivními tak objektivními metodami.

Podklady a informace pro jednotlivé kapitoly byli brány z odborných publikací, sympózií, vědeckých časopisů a souborů, analýz, meta-analýz i webových zdrojů technického či zdravotnického zaměření. Teoretická část posloužila jakožto podklad pro praktickou část diplomové práce.

Praktická část diplomové práce se skládá ze tří kapitol, zaměřující se na ověření dosavadních znalostí v oboru VR sickness, a využití poznatků při hledání řešení pro mitigaci tohoto jevu.

Kapitola čtvrtá vysvětlila postup a jednotlivé veličiny figurující v rámci uskutečněného měření jevu VR sickness. Bylo využito modifikovaného VR softwaru a měřících zařízení v podobě GSR senzorů. Bylo využito dotazníků NASA TLX a standardní verze SSQ. Jednotlivé položky jako použitá technologie, software a jeho modifikace, tak také samotný postup VR měření, byli zde náležitě popsány. V poslední řadě jsou zde předneseny výsledky VR měření a jejich porovnání s předchozími studii. Výsledky měření byli brány v potaz při hledání řešení VR sickness v kapitole páté.

V rámci kapitoly páté byly předneseny určité problémy současných VR systémů nebo lidské faktory, které přispívají k projevům VR sickness. Kapitola obsahuje soupis jednotlivých řešení, rozdělených do subkapitol, reprezentující určitý aspekt figurující ve virtuální realitě a při VR sickness.

Poslední šestá kapitola shrnuje významné poznatky v rámci diplomové práce. Jedná se konkrétně o relevantní a důležitá zjištění týkající se úkazu VR sickness, a praktikách na její mitigaci. Diskutováno je zde bylo o teoreticky nejprínosnějších řešeních, které současná doba umožňuje, pro zmírnění frekvence a dopadu VR sickness. Kapitola v poslední řadě uvedla limitace diplomové práce.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] BOROŠ, Martin, Eva SVENTEKOVÁ, Anna CIDLINOVA, Marek BARDY a Katerina BATRLOVA, 2022. Application of VR Technology to the Training of Paramedics. *Applied Sciences* [online]. **12**, 1172. Dostupné z: doi:10.3390/app12031172
- [2] BUHLER, Helmut, Sebastian MISZTAL a Jonas SCHILD, 2018. Reducing VR Sickness Through Peripheral Visual Effects. In: *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* [online]. s. 517–9. Dostupné z: doi:10.1109/VR.2018.8446346
- [3] HOWARD, Matt a Elise ZANDT, 2021. A meta-analysis of the virtual reality problem: Unequal effects of virtual reality sickness across individual differences. *Virtual Reality* [online]. **25**. Dostupné z: doi:10.1007/s10055-021-00524-3
- [4] CHANG, Eunhee, Hyun-Taek KIM a Byounghyun YOO, 2020. Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction* [online]. **36**, 1–25. Dostupné z: doi:10.1080/10447318.2020.1778351
- [5] KIM, Yoon Sang, JuHye WON, Seong-Wook JANG a Junho KO, 2022. Effects of Cybersickness Caused by Head-Mounted Display-Based Virtual Reality on Physiological Responses: Cross-sectional Study. *JMIR serious games* [online]. **10**[4], e37938. ISSN 2291-9279. Dostupné z: doi:10.2196/37938
- [6] KOURTESIS, Panagiotis, Rayaam AMIR, Josie LINNELL, Ferran ARGELAGUET a Sarah E. MACPHERSON, 2023. Cybersickness, Cognition, & Motor Skills: The Effects of Music, Gender, and Gaming Experience. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* [online]. **29**[5], 2326–2336. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2023.3247062
- [7] LOCHMANNOVA, Alena, Šimon MICHAL, Petr HOREJSI, Marek BÁRDY, Stanislava REICHERTOVÁ a Klára GILLERNOVÁ, 2022. The Use of Virtual Reality in Training Paramedics for a Mass Casualty Incident. *Applied Sciences* [online]. **12**, 11740. Dostupné z: doi:10.3390/app122211740
- [8] LUKŠ, Roman. *Examining Motion Sickness in Virtual Reality* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-10-21]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Vedoucí práce doc. Fotios Liarokapis, PhD. Dostupné z: <https://theses.cz/id/hu85by/>
- [9] MARTIROSOV, Sergo, Petr HOŘEJŠÍ, Pavel KOPEČEK, Marek BUREŠ a Michal ŠIMON, 2021. The Effect of Training in Virtual Reality on the Precision of Hand Movements. *Applied Sciences* [online]. **11**[17]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11178064
- [10] MAZLOUMI GAVGANI, Alireza, Frederick WALKER, Deborah HODGSON a Eugene NALIVAICO, 2018. A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and “classic” motion sickness: Are they different? *Journal of Applied Physiology* [online]. **125**. Dostupné z: doi:10.1152/jappphysiol.00338.2018
- [11] MELO, Miguel, José VASCONCELOS-RAPOSO a Maximino BESSA, 2017. Presence and cybersickness in immersive content: Effects of content type, exposure time and gender. *Computers & Graphics* [online]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cag.2017.11.007

- [12] PORCINO, Thiago, Daniela TREVISAN a Esteban CLUA, 2020. Minimizing cybersickness in head-mounted display systems: causes and strategies review. In: *2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* [online]. s. 154–163. Dostupné z: doi:10.1109/SVR51698.2020.00035
- [13] SAREDAKIS, Dimitrios, Ancret SZPAK, Brandon BIRCKHEAD, Hannah A. D. KEAGE, Albert RIZZO a Tobias LOETSCHER, 2020. Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in human neuroscience* [online]. **14**, 96. ISSN 1662-5161. Dostupné z: doi:10.3389/fnhum.2020.00096
- [14] SEVINC, Volkan a Mehmet BERKMAN, 2019. Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments. *Applied ergonomics* [online]. **82**, 102958. Dostupné z: doi:10.1016/j.apergo.2019.102958
- [15] SOMRAK, Andrej, Iztok HUMAR, M. Shamim HOSSAIN, Mohammed F. ALHAMID, M. Anwar HOSSAIN a Jože GUNA, 2019. Estimating VR Sickness and user experience using different HMD technologies: An evaluation study. *Future Generation Computer Systems* [online]. **94**, 302–316. ISSN 0167-739X. Dostupné z: doi:10.1016/j.future.2018.11.041
- [16] ZHANG, Jingjing, Mengjie HUANG, Rui YANG, Yiqi WANG, Xiaohang TANG, Ji HAN a Hai-Ning LIANG, 2023. Understanding the effects of hand design on embodiment in virtual reality. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* [online]. **37**. Dostupné z: doi:10.1017/S0890060423000045
- [17] SHAFER, Daniel, Corey CARBONARA a Michael KORPI, 2017. Modern Virtual Reality Technology: Cybersickness, Sense of Presence, and Gender. *Media Psychology Review*. **11**. Dostupné z :  
[https://www.researchgate.net/publication/322202078\\_Modern\\_Virtual\\_Reality\\_Technology\\_Cybersickness\\_Sense\\_of\\_Presence\\_and\\_Gender](https://www.researchgate.net/publication/322202078_Modern_Virtual_Reality_Technology_Cybersickness_Sense_of_Presence_and_Gender)
- [18] HAMAD, Ayah a Bochen JIA, 2022. How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives: An Overview of the Current and Potential Applications and Limitations. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. **19**, 11278. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph191811278
- [19] SIRAZHIDEN, Damira, 2020. VR and AR technologies in the modern cultural space and their role in environmental education. *E3S Web of Conferences* [online]. **217**, 08002. Dostupné z: doi:10.1051/e3sconf/202021708002
- [20] KABIGTING, Lea, 2021. Computer Simulation on Teaching and Learning of Selected Topics in Physics. *European Journal of Interactive Multimedia and Education* [online]. **2**, e02108. Dostupné z: doi:10.30935/ejimed/10909
- [21] SCHOTT, Christian a Stephen MARSHALL, 2020. Full-immersion virtual reality for experiential education: An exploratory user experience analysis. *Australasian Journal of Educational Technology* [online]. **37**, 96–110. Dostupné z: doi:10.14742/ajet.5166
- [22] KEVIN, Kelly. "The Untold Story of Magic Leap, the World's Most Secretive Startup". WIRED. 2016 [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2016/04/magic-leap-vr/>

- [23] LOVREGLIO, Sélím DATOUSSAÏD a Thierry DESCAMPS, 2021. Prototyping and Validating a Non-immersive Virtual Reality Serious Game for Healthcare Fire Safety Training. *Fire Technology* [online]. **57**[6], 3041–3078. ISSN 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-021-01098-x
- [24] Atria Admissions Team. AtriaUniversity.edu.in: The Ultimate Guide & Types of Virtual Reality [online]. Indie: Univerzita Atria, 2022 [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://www.atriauniversity.edu.in/types-of-virtual-reality/#Virtual-Reality-and-Augmented-Reality>
- [25] Virtual Reality. In: Merriam-Webster.com: Dictionary [on-line]. 2023. [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual%20reality>
- [26] Augmented reality. In: Merriam-Webster.com: Dictionary [on-line]. 2023. [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/augmented%20reality>
- [27] Mixed Reality. In: Dictionary.com [on-line]. 2023. [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://www.dictionary.com/browse/mixed-reality>
- [28] Simulator. In: Dictionary.cambridge.org [on-line]. Cambridge University Press. 2023 [cit. 24.10.2023]. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/simulator>
- [29] MITTAL, Himani, 2020. Virtual Reality: An Overview. *CSI Communications* [online]. **44**, 9. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/343095838\\_Virtual\\_Reality\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/343095838_Virtual_Reality_An_Overview)
- [30] KAPLAN, Alexandra D., Jessica CRUIT, Mica ENDSLEY, Suzanne M. BEERS, Ben D. SAWYER a P. A. HANCOCK, 2021. The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis. *Human Factors* [online]. **63**[4], 706–726. ISSN 0018-7208. Dostupné z: doi:10.1177/0018720820904229
- [31] THOMPSON, Sara. Tomshardware.com [Online]: VR Lens Basics: Present And Future. USA, Future US, Inc., 2018. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/news/virtual-reality-lens-basics-vr,36182.html>. [cit. 24.10.2023]
- [32] BROWN, Rory. VRcompare [Online]. Dostupné z: <https://vr-compare.com>. [cit.24.10.2023]
- [33] Hypervision. hypervision.ai [Online]: Human natural Vision vs VR vision. Israel, 2023. Dostupné z: <https://www.hypervision.ai/copy-of-vr-vs-human-vision>. [cit. 24.10.2023]
- [34] Department for Business and Trade, Office for Product Safety and Standards, and Department for Business, Energy & Industrial Strategy, www.gov.uk [online]. *The safety of domestic virtual reality systems*, 2020. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/publications/safety-of-domestic-virtual-reality-systems>

- [35] Inter IKEA newsroom. Ikea.com [Online]: IKEA Place app launched to help people virtually place furniture at home. Nizozemsko, 2017. Dostupné z: <https://www.ikea.com/global/en/newsroom/innovation/ikea-launches-ikea-place-a-new-app-that-allows-people-to-virtually-place-furniture-in-their-home-170912/>
- [36] Samsung Electronics Co.,Ltd. Samsung.com [online]. *Use AR Zone on your Galaxy phone or tablet*. 2023. Dostupné z: <https://www.samsung.com/us/support/answer/ANS00091362/>
- [37] Terminal Eleven. *SkyView® Lite* [Mobile app]. 2023. Google Play. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.t11.skyviewfree&hl=en&gl=US&pli=1>
- [38] Stellarium Labs. *Stellarium Mobile - Star Map* [Mobile app]. 2023. Google Play. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.t11.skyviewfree&hl=en&gl=US>
- [39] The Pokemon Company. Niantic, Inc. *Pokémon GO* [Mobile app]. 2023. Google Play. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nianticlabs.pokemongo>
- [40] VLASOV, Sergey a Nikolay BORGEST, 2020. *Application of VR and AR Technologies in Educational Process* [online]. Dostupné z: doi:10.2991/aisr.k.201029.016
- [41] Dfreight. dfreight.org [online]. The Power of Augmented Reality in Logistics. 2023. Dostupné z: <https://dfreight.org/blog/the-power-of-augmented-reality-in-logistics/>
- [42] VR education. vreducation.cz [online]. 2023. Dostupné z: <https://vreducation.cz/rozsirena-realita/ar-chytre-bryle/> [cit.24.10.2023]
- [43] KAUFELD, Mara, Martin MUNDT, Sarah FORST a Heiko HECHT, 2022. Optical see-through augmented reality can induce severe motion sickness. *Displays* [online]. **74**, 102283. ISSN 0141-9382. Dostupné z: doi:10.1016/j.displa.2022.102283
- [44] Adobe. adobe.com [online]. Co je smíšená realita?. 2023. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/products/substance3d/discover/mixed-reality.html>
- [45] Microsoft. learn.microsoft.com [online]. Introduction to mixed reality. 2023. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/training/modules/intro-to-mixed-reality/7-use-cases-examples>
- [46] DE BACK, Tycho T., Angelica M. TINGA, Phong NGUYEN a Max M. LOUWERSE, 2020. Benefits of immersive collaborative learning in CAVE-based virtual reality. *International Journal of Educational Technology in Higher Education* [online]. **17**[1], 51. ISSN 2365-9440. Dostupné z: doi:10.1186/s41239-020-00228-9
- [47] BARBOUR, Niel. spglobal.com [online]. Top 10 VR Games By Revenue. 2020. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/top-10-vr-games-by-revenue>
- [48] KORE, Akshay. wevolver.com [online]. Display technologies for Augmented and Virtual Reality. 2019. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/display-technologies-for-augmented-and-virtual-reality>
- [49] Steantycip. steantycip.com [online]. What to Look For When Buying a VR Headset. 2019. Dostupné z: <https://steantycip.com/blog/what-to-look-for-when-buying-a-vr-headset/>

- [50] M. FANDÁKOVÁ, K. ZÁBOVSKÁ, B. BUČKO, a M. ZÁBOVSKÝ, 2020. Improvements of Computer Assisted Virtual Environment (CAVE). In: *2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO): 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)* [online]. s. 1680–1684. ISBN 2623-8764. Dostupné z: doi:10.23919/MIPRO48935.2020.9245349
- [51] STANNEY, K. M., LAWSON, B. D., OMAN, C. M., eds., 2021. *Cybersickness in Virtual Reality Versus Augmented Reality*. Lausanne: Frontiers Media SA.  
doi: 10.3389/978-2-88971-812-2 Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/research-topics/12692/cybersickness-in-virtual-reality-versus-augmented-reality>
- [52] DUŽMAŇSKA, Natalia, Paweł STROJNY a Agnieszka STROJNY, 2018. Can Simulator Sickness Be Avoided? A Review on Temporal Aspects of Simulator Sickness. *Frontiers in Psychology* [online]. **9**. ISSN 1664-1078. Dostupné z: doi:10.3389/fpsyg.2018.02132
- [53] ZHANG, Li-Li, Jun-Qin WANG, Rui-Rui QI, Lei-Lei PAN, Min LI a Yi-Ling CAI, 2016. Motion Sickness: Current Knowledge and Recent Advance. *CNS neuroscience & therapeutics* [online]. **22**[1], 15–24. ISSN 1755-5949 1755-5930. Dostupné z: doi:10.1111/cns.12468
- [54] Cleveland clinic. [clevelandclinic.org](https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/12782-motion-sickness) [online]. Motion Sickness. 2023. Dostupné z: <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/12782-motion-sickness>
- [55] Takov V, Tadi P. StatPearls [online]. Motion Sickness. 2023. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539706/>
- [56] Cleveland clinic. [clevelandclinic.org](https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/22417-cortisol-test) [online]. Cortisol Test. 2023. Dostupné z: <https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/22417-cortisol-test>
- [57] KOCH, Andreas, Ingolf CASCORBI, Martin WESTHOFEN, Manuel DAFOTAKIS, Sebastian KLAPA a Johann Peter KUHTZ-BUSCHBECK, 2018. The Neurophysiology and Treatment of Motion Sickness. *Deutsches Arzteblatt international* [online]. **115**[41], 687–696. ISSN 1866-0452. Dostupné z: doi:10.3238/arztebl.2018.0687
- [58] WOO, Ye Shin, Kyoung-Mi JANG, Sun Gu NAM, Moonyoung KWON a Hyun Kyoong LIM, 2023. Recovery time from VR sickness due to susceptibility: Objective and quantitative evaluation using electroencephalography. *Heliyon* [online]. **9**[4], e14792. ISSN 2405-8440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14792
- [59] BROWN, Phillip, Pieter SPRONCK a Wendy POWELL, 2022. The simulator sickness questionnaire, and the erroneous zero baseline assumption. *Frontiers in Virtual Reality* [online]. **3**. ISSN 2673-4192. Dostupné z: doi:10.3389/frvir.2022.945800
- [60] BIMBERG, Pauline, Tim WEISSKER a Alexander KULIK, 2020. On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* [online]. s. 464–467. Dostupné z: doi:10.1109/VRW50115.2020.00098
- [61] Dimaandal, P. 2020. Virtual Reality: The Next American Meta-Medium. *UC Merced Undergraduate Research Journal* [Online], 12[1]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5070/M4121046303>

- [62] Virtual reality society. vrs.org.uk [online]. History Of Virtual Reality. Spojené království, © 2017. Dostupné z: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>
- [63] MANUELRAJ, R. Medium.com [online]. HMD vs CAVE in the world of VR. USA. XRPractices. 2020. Dostupné z: <https://medium.com/xrpractices/hmd-vs-cave-in-the-world-of-vr-a0c9cbfb435a>
- [64] AINSWORTH, R. eteknix.com [online]. Nvidia Already Working on Next-Gen VR System. USA. XRPractices. 2020. Dostupné z: <https://www.eteknix.com/nvidia-already-working-on-next-gen-vr-system/>
- [65] Valve. valvesoftware.com [online]. Controllers. USA. © 2023. Dostupné z: <https://www.valvesoftware.com/en/index/controllers>
- [66] MOORE-COLYER, R. tomguide.com [online]. Meta Quest 3 may have just been revealed early along with new features. USA. 2023. Dostupné z: <https://www.tomguide.com/news/meta-quest-3-may-have-just-been-revealed-early-along-with-new-features>
- [67] CASTLE, K. rockpapershotgun.com [online]. Valve Index review: the gold standard for VR headsets. USA. 2020. Dostupné z: <https://www.rockpapershotgun.com/valve-index-review>
- [68] TREMMEL, Christoph a Dean KRUSIENSKI, 2019. *EEG Spectral Conditioning for Cognitive-state Classification in Interactive Virtual Reality* [online]. Dostupné z: doi:10.1109/SMC.2019.8914264
- [69] PETTIT, H. thesun.co.uk [online]. PS5 will launch with secret Sony VR headset that turns your living room into a video game, report claims. Spojené království. 2019. Dostupné z: <https://www.thesun.co.uk/tech/10130842/ps5-launch-sony-vr-headset/>
- [70] APRILE, Irene, Maurizio FERRARIN, Luca PADUA, Enrica DI SIPIO, Chiara SIMBOLOTTI, Sergio PETRONI, Costanza TREDICI a Anna DICKMANN, 2014. Walking strategies in subjects with congenital or early onset strabismus. *Frontiers in human neuroscience* [online]. **8**, 484. Dostupné z: doi:10.3389/fnhum.2014.00484
- [71] BAKER, A. thewild.com [online]. Getting Started with VR for Your Architecture & Design Team in 2022. USA. 2022. Dostupné z: <https://thewild.com/blog/architect-getting-started-with-vr#top>
- [72] KAMINSKY, G. ptc.com [online]. How to choose the right augmented reality device for your organization. USA. 2020. Dostupné z: <https://www.ptc.com/en/blogs/ar/choose-the-right-augmented-reality-device-for-your-organization>
- [73] Adobe. adobe.com [online]. Co je smíšená realita?. USA. © 2023. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/products/substance3d/discover/mixed-reality.html>
- [74] Havelsan. havelsan.com [online]. Havelsan full flight simulators. USA. © 2023. Dostupné z: <https://www.havelsan.com.tr/en/sectors/training-and-simulation/civil-aviation/havelsan-full-flight-simulators>
- [75] ABDELRAHMAN, M., Amjad BELRAMMAN a Bijendra PATEL, 2018. Acquiring basic and advanced laparoscopic skills in novices using two-dimensional (2D), three-dimensional (3D) and ultra-high definition (4K) vision systems: A randomized control study. *International Journal of Surgery* [online]. **53**. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijssu.2018.03.080
- [76] NASA. humansystems.arc.nasa.gov [online]. NASA Task Load Index. [cit. 2024-3-14]. Dostupné z: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/downloads/TLXScale.pdf>

- [77] NASA. humansystems.arc.nasa.gov [online]. NASA TLX: Task Load Index. [cit. 2024-3-14]. Dostupné z: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>
- [78] HERMAN, Lukáš. *Porovnání subjektivního a objektivního měření únavy pilotů* [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-3-14]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní. Vedoucí práce Ing. Lenka Hanáková, doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90498/F6-BP-2020-Herman-Lukas-Plny%20text.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [79] TEAERGO, teaergo.com [online]. Captiv. [cit. 2024-3-14]. Dostupné z: <https://www.teaergo.com/products/tea-captiv-t-sens-gsr/>
- [80] TEAERGO, teaergo.com [online]. Captiv. [cit. 2024-3-14]. Dostupné z: <https://www.teaergo.com/captiv/>
- [81] Texoft. *NASA TLX - Task Load Index* [Mobile app]. 2021. Google Play. Dostupné z: [https://play.google.com/store/apps/details?id=org.texoft.nasa\\_tlx&hl=en&gl=US&pli=1](https://play.google.com/store/apps/details?id=org.texoft.nasa_tlx&hl=en&gl=US&pli=1)
- [82] Immersion VR. immersionvr.co.uk [online]. Monoscopic vs Stereoscopic 360 VR. 2024. Dostupné z: <https://immersionvr.co.uk/blog/monoscopic-vs-stereoscopic-360-vr>
- [83] ZHOU, Yao, Jufan ZHANG a Fengzhou FANG, 2022. Design of the varifocal and multifocal optical near-eye see-through display. *Optik* [online]. **270**, 169942. ISSN 0030-4026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2022.169942
- [84] Holoxica. holoxica.com [online]. Light Field Displays. 2024. Dostupné z: <https://www.holoxica.com/light-field-displays>
- [85] Haptx. haptx.com [online]. 2024. Dostupné z: <https://haptx.com/>
- [86] Bhaptics. bhaptics.com [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.bhaptics.com/>
- [87] Carther R. xrtoday.com [online]. Meta Quest Pro vs Meta Quest 2: Which is Best?. Spojené království. 2023. Dostupné z: <https://www.xrtoday.com/virtual-reality/meta-quest-pro-vs-meta-quest-2-which-is-best/>
- [88] Merchant W. a Kirollos R, 2022. *An Overview of Cybersickness Self-Report Measures for use in Defence Research and Development Canada Experiments* [online]. Technical Report DRDC-RDDC-2022-D063. Defence Research and Development Canada. Dostupné z: [https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc392/p814963\\_A1b.pdf](https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc392/p814963_A1b.pdf)
- [89] NOTLEY, Sean R., Joonhee PARK, Kyoko TAGAMI, Norikazu OHNISHI a Nigel A. S. TAYLOR, 2017. Variations in body morphology explain sex differences in thermoeffector function during compensable heat stress. *Experimental Physiology* [online]. **102**(5), 545–562. ISSN 0958-0670. Dostupné z: doi:10.1113/EP086112
- [90] SCHMIDT, Madison D., Sean R. NOTLEY, Robert D. MEADE, Ashley P. AKERMAN, Maura M. RUTHERFORD a Glen P. KENNY, 2022. Revisiting regional variation in the age-related reduction in sweat rate during passive heat stress. *Physiological reports* [online]. **10**(7), e15250. ISSN 2051-817X. Dostupné z: doi:10.14814/phy2.15250

# PŘÍLOHY

## Příloha č. 1 - Vstupní dotazník

### Studie VR sickness

Zaobíráme se výzkumem VR sickness a dopadů tohoto úkazu na efektivitu a pohodu uživatele během VR prožitku. V rámci měření vám nejdříve bude položeno pár otázek ohledně vás v rámci vstupního dotazníku, následovaném samotným měřením ve VR. Vstupní dotazník je velmi krátký (cca 3 - 5 minut), vyžaduje vyplnění pár osobních otázek, avšak zachovává vaši anonymitu.

VR Měření simulují situaci montáže dílu v průmyslové hale, během kterého budeme pomocí několika senzorů sledovat váš tělesný stav. Po ukončení váš zážitek vyhodnotíme dvěma

krátkými dotazníky (NASA TLX a SSQ). Měření provedeme celkem dvakrát, kdy jedno z měření bude prováděno během ztěžujících podmínek v podobě nabuzení VR sickness, a druhé bez.

Cenná data která nám tímto poskytnete nám pomohou k hlubšímu porozumění problematiky VR sickness a nalezení způsobů, které by mohli tomuto úkazu předcházet. Převélice vám děkujeme za vaše zapojení a příspěvek tomuto výzkumu!

---

[Přihlaste se do Googlu](#), abyste mohli uložit dosavadní postup. [Další informace](#)

---

\* Označuje povinnou otázku

Vaše přidělené identifikační číslo subjektu? \*

Vaše odpověď

---

Vaše Identita? \*

- Muž
- Žena
- Jiné:



Do jaké věkové skupiny spadáte? \*

- Mladší než 25
- 25 - 39
- 40 - 65
- Starší než 65

Jak se aktuálně cítíte/Jak vám je? \*

- |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | 6                     | 7                     | 8                     | 9                     | 10                    |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Trpíte v současné době nějakým onemocněním? \*

- Ano
- Ne

Kolik času denně trávíte u videoher? \*

- Méně než 1 hodinu
- 1 - 3 hodiny
- 4 - 6 hodin
- 7 - 9 hodin
- 10 - 12 hodin
- Více než 12 hodin

Máte předešlou zkušenost s VR? \*

- Ano
- Ne

Trpíte nebo máte sklony ke Kinetóze? (Pocit nevolnosti během transportu. Například jízda autem) \*

- Ano
- Ne

## Příloha č. 2 - Simulation Sickness Questionnaire dotazník

No \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

### SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal (1993)\*\*\*

Instructions : Circle how much each symptom below is affecting you right now.

1. General discomfort	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
2. Fatigue	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
3. Headache	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
4. Eye strain	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
5. Difficulty focusing	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
6. Salivation increasing	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
7. Sweating	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
8. Nausea	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
9. Difficulty concentrating	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
10. « Fullness of the Head »	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
11. Blurred vision	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
12. Dizziness with eyes open	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
13. Dizziness with eyes closed	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
14. *Vertigo	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
15. **Stomach awareness	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>
16. Burping	<u>None</u>	<u>Slight</u>	<u>Moderate</u>	<u>Severe</u>

\* Vertigo is experienced as loss of orientation with respect to vertical upright.

\*\* Stomach awareness is usually used to indicate a feeling of discomfort which is just short of nausea.

Last version : March 2013

\*\*\*Original version : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.

SSQ Symptom	Weight		
	N	O	D
General discomfort	1	1	
Fatigue		1	
Headache		1	
Eyestrain		1	
Difficulty focusing		1	1
Increased salivation	1		
Sweating	1		
Nausea	1		1
Difficulty concentrating	1	1	
Fullness of head			1
Blurred vision		1	1
Dizzy (eyes open)			1
Dizzy (eyes closed)			1
Vertigo			1
Stomach awareness	1		
Burping	1		
Total	[1]	[2]	[3]

$$N = [1] \times 9.54$$

$$O = [2] \times 7.58$$

$$D = [3] \times 13.92$$

$$TS = ([1] + [2] + [3]) \times 3.74$$

SSQ Score	Categorisation	Number of responses (%)
0	No symptoms	3 (3.2%)
<5	Negligible symptoms	4 (4.3%)
5–10	Minimal symptoms	2 (2.2%)
10–15	Significant symptoms	11 (11.8%)
15–20	Symptoms are a concern	5 (5.4%)
>20	A bad intervention	68 (73.1%)

Číslo Subjektu: **SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE**

Datum: \_\_\_\_\_

Are you motion sick now? Circle YES or NO

Zakroužkujte jak v současné době na sobě registrujete následující symptomy:

Circle how much each symptom below is affecting you now

0 = „Žádné“      1 = „Mírné“      2 = „Střední“      3 = „Závažné“

1. Obecné nepohodlí	0	1	2	3
2. Únava	0	1	2	3
3. Bolest hlavy	0	1	2	3
4. Námáhané oči	0	1	2	3
5. Problém zaostřit	0	1	2	3
6. Zvýšená produkce slin	0	1	2	3
7. Pocení	0	1	2	3
8. Nevolnost	0	1	2	3
9. Problémy s koncentrací	0	1	2	3
10. Napětí/Těžkost hlavy	0	1	2	3
11. Rozmazané vidění	0	1	2	3
12. Závrať (oči otevřené)	0	1	2	3
13. Závrať (oči zavřené)	0	1	2	3
14. Vertigo/Narušená rovnováha*	0	1	2	3
15. Podrážděný žaludek**	0	1	2	3
16. Krkání	0	1	2	3

\*Vertigem se myslí ztráta koncentrace s ohledem na vzpřímenou polohu těla

\*\* Podrážděným žaludkem obecně myslíme nepříjemný pocit který je jen kousek od nevolnosti



