Webová virtuální realita: nový způsob prezentace geoprostorových dat

Diplomová práce

Jan Horák

Vedoucí práce: RNDr. Lukáš Herman, Ph.D.

Geografický ústav

**BRNO 202?(3)**



Bibliografický záznam

|  |  |
| --- | --- |
| Autor/Autorka: | Bc. Jan Horák  Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  Geografický ústav |
| Název práce: | Webová virtuální realita: nový způsob prezentace geoprostorových dat |
| Studijní program: | Geografická kartografie a geoinformatika |
| Studijní obor: | Geografická kartografie a geoinformatika |
| Vedoucí práce: | RNDr. Lukáš Herman, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/2023 |
| Počet stran: | xx |
| Klíčová slova: | Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo, Klíčové slovo |

Bibliografický entry

|  |  |
| --- | --- |
| Author: | Bc. Jan Horák  Faculty of Science, Masaryk University  Department of Geography |
| Title of Thesis: | Web virtual reality: a new way of presenting geospatial data |
| Degree Programme: | Cartography and geoinformatics |
| Field of Study: | Cartography and geoinformatics |
| Supervisor: | RNDr. Lukáš Herman, Ph.D. |
| Academic Year: | 2022/2023 |
| Number of Pages: | xx |
| Keywords: | Keyword, Keyword, Keyword, Keyword, Keyword, Keyword, Keyword, Keyword |

Abstrakt

Tato práce se zabývá..

Abstract

Bachelor thesis..

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Masarykova univerzita** |  |
|  |
| **Přírodovědecká fakulta** |

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**Student: Bc. Jan Horák**

**Studijní program: Geografická kartografie a geoinformatika**

**Studijní obor: Geografická kartografie a geoinformatika**

Ředitel Geografického ústavu Přírodovědecké fakulty MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

**Webová virtuální realita: nový způsob prezentace geoprostorových dat**

**Web virtual reality: a new way of presenting geospatial data**

Zásady pro vypracování:

Práce bude zaměřena na technologie pro tvorbu virtuální reality v rámci webového prostředí (např. WebXR, Three.js). Tyto technologie jsou podporovány na různých hardwarových a softwarových platformách, jejich funkcionalita se může v různých podmínkách lišit. Na základě srovnání dostupných technologiích bude vybrána technologie pro vytvoření vlastní vizualizace prostorových dat z vybrané aplikační oblasti. Vytvořená vizualizace bude následně uživatelsky evaluována a zhodnocena tak její funkcionalita.

Pro naplnění hlavního cíle diplomové práce postupujte přes následující dílčí cíle:

1. Popis a analýza technologií pro tvorbu virtuální reality v rámci webového prostředí

2. Praktické porovnání konkrétních technologií na různých hardwarových a softwarových platformách

3. Návrh a implementace vlastní aplikace na principech virtuální reality

4. Uživatelské ověření vytvořené aplikace

5. Diskuse zjištěných výsledků a závěr

Rozsah grafických prací: ?

Rozsah průvodní zprávy: ?

Seznam odborné literatury:

BUTCHER, P. W. S., JOHN, N. W., RITSOS, P. D. (2021): VRIA: A Web-Based Framework for Creating Immersive Analytics Experiences. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, roč. 27, č. 7, s. 3213–3225. http://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2965109

LAKONSO, D., ADITYA, T. (2019): Utilizing A Game Engine for Interactive 3D Topographic Data Visualization. ISPRS International Journal of Geo-Information, roč. 8, č. 8. https://doi.org/10.3390/ijgi8080361

RZESZEWSKI, M., ORYLSKI, M. (2021): Usability of WebXR Visualizations in Urban Planning. ISPRS International Journal of Geo-Information, roč. 10, č. 11. https://doi.org/10.3390/ijgi10110721

STACHOŇ, Z., KUBÍČEK, P. HERMAN, L. (2020): Virtual and Immersive Environments. Wilson, J. P.: The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge. Ithaca, New York, UCGIS. https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/virtual-and-immersive-environments

SEO, D., YOO, B. (2020): Interoperable information model for geovisualization and interaction in XR environments, International Journal of Geographical Information Science, roč. 34, č. 1. s. 1–30. https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1706739

ŠTĚRBA, Z., ŠAŠINKA, Č., STACHOŇ, Z., ŠTAMPACH, R., MORONG, K. (2015): Selected Issues of Experimental Testing in Cartography. Masaryk University, Brno, 107 s., ISBN 978-80-210-7909-0.

*Jazyk závěrečné práce:* čeština

*Vedoucí bakalářské práce*: RNDr. Lukáš Herman, Ph.D.

|  |  |
| --- | --- |
| *Datum zadání diplomové práce*: | ? |
| *Datum odevzdání bakalářské práce*: | podle harmonogramu |

RNDr. Vladimír Herber, CSc.

pedagogický zástupce ředitele ústavu

Poděkování

Lukáš Herman, … atd.

Prohlášení (dodelat odsazení podle délky poděkování)

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou/diplomovou práci vypracoval(-a) samostatně pod vedením RNDr. Lukáše Hermana, Ph.D. a s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno … 2023 Jan Horák

|  |
| --- |
| Jméno Příjmení |

OBSAH

--- obsah až bude ---

# Úvod

Tvorba virtuálních realit (alternativních světů) má kořeny hluboko v lidské historii. Při dostatečné abstrakci je možné vnímat virtuální realitu jako médium komunikace a způsob zobrazení reálných nebo fiktivních světů. S touto definicí je možné nahlížet na historii virtuální reality skrze prizma obrazů na stěnách jeskyň, vyprávění reálných i imaginárních událostí, malby na plátnech, fotografie, filmy, videohry – a dospět až k současné virtuální realitě.

Tato myšlenka vede k názoru, že vývoj technologie je pevně provázán s rozvojem médií určených pro tvorbu různých forem virtuální reality. Dnes umožňuje práci s tvorbou virtuální reality především výpočetní technika, která slouží jako médium i nástroj pro lidskou komunikaci ve virtuálním prostoru. Za účelem tvorby kvalitní virtuální reality je nutná znalost nástrojů pro její tvorbu. Stejně jako malíř musel znát výhody a nevýhody druhů plátna, barev a štětců musí dnes člověk který chce tvořit virtuální realitu znát jemu dostupné technologie a zvolit nejlepší pro jeho účel.

Virtuální realita nemusí znamenat čistě fiktivní světy, ale v případě prostorové informace je primárním zájmem imitace reálného světa v tom digitálním s přístupem umožňujícím pocit přítomnosti blížící se reálnému zážitku. Na druhou stranu virtuální realita se nemusí snažit o kopii reálného světa, ale může cílit k tvorbě zjednodušené verze reality, kdy je kladen důraz na specifickou charakteristiku, kterou v realitě není schopné pozorovat (např. zobrazení statistických dat pomocí prostorových proměnných).

V případě pohledu na virtuální realitu jako způsobu komunikace se nabízí myšlenka jejího propojení s internetovým prostředím, které je možné považovat za stále rostoucí způsob lidské komunikace a interakce. Toto propojení přináší jednak dostupnost tak i možnost sdílení, interakce, popř. vzájemné kolaborace což odborná literatura považuje za stěžejní pilíře virtuální reality.

Přestože existuje nabídka desktopových softwarů, které umožňují vytváření virtuálních realit, nejsou vždy snadno dostupné pro běžné uživatele. Mnoho lidí má zájem o atraktivní výsledky, které jim umožní vizualizovat svět kolem nich, avšak nechtějí naučit, popř. ani nejsou schopni pracovat s často složitými desktopovými programy. Právě v této souvislosti umožňují nástroje ve webovém prostředí alternativu. Volba webového prostředí jakožto platformy pro virtuální realitu však nepřináší pouze benefity. Ačkoliv odstraňuje mnohé překážky pro uživatele, v některých aspektech (detail, výkonost, komplexita) je přenáší na vývojáře / tvůrce virtuální reality. Webové prostředí samo o sobě je velice rozmanitý ekosystém technologií, k tomu navíc je nutné uvažovat možnosti hardwarových zobrazovacích a vstupních zařízení. Je tedy žádoucí vyjasnit, jak se v tomto systému zorientovat pro účel vizualizace geografických dat ve virtuální realitě.

Dosavadní způsob, jakým byla geografická informace vizualizována a komunikována se převážně soustředil na 2D reprezentaci, tedy na mapy. Avšak v dnešní digitální éře technologický vývoj vede k tomu, že je možné si představit a prozkoumávat prostor ve třetí dimenzi. Zde se naskýtá otázka, jaký vztah existuje mezi tradičními mapami a novou formou virtuální reality? Je virtuální realita pouze dalším médium nebo znamená pokrok ve způsobu, jakým komunikujeme prostorové informace? Je možné virtuální realitu zobrazující geoprostorovou informaci považovat za interaktivní 3D mapu? Kde leží hranice mezi mapou a virtuální realitou do jaké míry jsou oba tyto prostředky abstrakcí reality? Tato práce na tyto otázky nezodpovídá, ale snaží se dát kontext pro jejich zodpovězení ve formě znalosti možností nástrojů umožňující tvorbu virtuální reality na webu.

Práce se nejdříve zaměří na teoretické základy virtuální reality. Následně na analýzu možných využití virtuální reality jakožto média pro vizualizaci geoprostorové informace. Klíčovou částí pak bude analýza soudobých technologií a jejich zhodnocení spolu s pilotní implementací webové aplikace zobrazující geografická data pro vybraný účel. Finální částí pak bude uživatelské zhodnocení výsledné pilotní aplikace.

## Cíle práce

Hlavní cíle práce:

* Analýza a zhodnocení aktuálních webových technologií umožňující publikaci prostorových dat v rámci virtuální reality. ¨
* Vývoj pilotní aplikace pomocí vybraných technologií.

Hlavním cílem práce je analýza a následné zhodnocení soudobých technologií, a to jak hardwarových (HMD, mobilní telefony, stolní počítače) tak softwarových (webové prohlížeče, knihovny, frameworky) a jejich propojení, umožňujících tvorbu virtuálních prostředí s geografickou konotací v rámci webového prostředí. Mimo výslednou vizualizační aplikaci by výstupem práce bude i odborné doporučení, jaké technologie jsou vhodné s ohledem na zvolený účel.

Dalším cílem této práce je vytvoření a následná uživatelská evaluace funkcionality webové aplikace využívající prostředků virtuální reality, jakožto nástroje k prezentaci geografických dat. Aplikace bude vytvořena na základě analýze technologií v první fázi práce. Tato praktická část bude následně podkladem pro odborné doporučení vhodnosti technologií pro daný účel.

### Výzkumné otázky

#TODO – jak správně formulovat

Jsou současné technologie umožňující tvorbu virtuální reality ve webovém prostředí vhodné pro prezentaci geografických dat?

Jaké jsou faktory ovlivňující volbu technologie pro vizualizaci dat ve VR.

# Metodika

Vlastní vizualizace bude vytvořena na základě podrobného průzkumu technologií v kontextu geografické vizualizace. Není možné vytvořit funkční mapu / vizualizaci / aplikaci, bez důkladného promyšlení příčin, které předurčují splnění účelu dané práce (Sterba et al. 2015). Z tohoto důvodu je nutné identifkovat geoprostorová témata pro která je vhodné využit vizualizace v rámci virtuální reality. Na základě těchto témat je nutné určit, jaká využívají geografická data a jaké dopady mají tato data na volbu postupů a technologií při jejich vizualizaci. Právě tyto prerekvizity a další specifické jako je aktuálnost, standardizace otevřenost aj. je nutné mít na paměti při analýze a následném výběru technologií pro vizualizaci. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit sadu požadavků.

# Rešerše – Současný stav řešené problematiky

Za účelem získání obecného přehledu o problematice je vhodný průzkum obecných publikací jednak z oblastí počítačové grafiky (Žára, Beneš, Felkel 2005; Marschner et al. 2021), geoinformační vědy (Guo, Goodchild, Annoni 2020; Bolstad 2019; Kresse, Danko 2012; Longley et al. 2015), kartografické geo-vizualizace (Slocum 2014; Çöltekin et al. 2020a; Christophe 2020; Dykes, MacEachren, Kraak 2005), webových technologií (Dorman 2020) a virtuální / rozšířené reality (Milgram, Kishino 1994; LaValle 2020; Sherman, Craig 2019; Mazuryk, Gervautz 1999).

Koncept virtuální reality obecně představují výše uvedené publikace. Z hlediska geoinformatiky a geografie je vhodnější koncept virtuálních geografických prostředí, tedy VGE (*virtual geographic environment*) tento způsob pohledu představují (Stachon, Kubicek, Herman 2020; Çöltekin et al. 2020b; Batty 1997; Lin, Batty 2011; MacEachren et al. 1999; Blokdyk 2018; Lin et al. 2013).

Prerekvizitou úspěšné geoprostorové vizualizace, jak tradiční, tak v rámci virtuálních prostředí, je podrobné porozumění vstupním datům tedy datovým modelům, metodám zpracování a výměny mezi technologiemi (Keil et al. 2021). Jelikož předností virtuální reality je prezentace více rozměrných dat (šířka, délka, výška, popř. jiná veličina). Základy modelování takových to dat řeší (Abdul-Rahman, Pilouk 2008). Problematiku převodu 2D do 3D dat rozebírá (Halik 2018). Kompletní postup od získání geoprostorových dat přes integraci po jejich vizualizaci představují (Zhao et al. 2019; Laksono, Aditya 2019; Herman 2011; 2014; Buyuksalih et al. 2017; Keil et al. 2021). Zaměření na technické aspekty sběru a následně publikace 3D pomocí webového informačního sytému řeší (Cibula 2021). Mimo samotná data je také nutné mít na paměti kartografická pravidla a principy při vizualizaci především 3D dat (Pegg 2008).

Proto aby vizualizace plnila svůj účel je nutné, aby byla přístupná uživatelům. Přístupnost v kontextu této práce představuje publikace vizualizace ve webovém prostředí. Problematikou rozšířené reality ve webovém prostředí se zabývá (Maclntyre, Smith 2018). Podrobný návod tvorby VR prostředí na webu představuje (Baruah 2021). (Butcher, John, Ritsos 2021) představuje webový framework pro tvorbu obecných vizualizací dat ve VR na webu. V případě VGE je často řešena problematika distribuovaných *kolaborativních* prostředí v rámci rozšířené reality. Obecně tuto problematiku řeší (Lee, Yoo 2021; Šašinka et al. 2019), v geoinformačním kontextu pak (Sermet, Demir 2021). #TODO Mozila Hubs aj.

Za účelem vhodného výběru technologie pro vývoj XR aplikace pro prezentaci geoprostorových dat je vhodný široký průzkum případových studií a jejich následná typologie na základě tematického zaměření, ale i využité technologie. Vizualizaci terénu pomocí herních enginů řeší (Mat et al. 2014). Komplexnější scény za pomocí herních enginů pak představují (Ugwitz, Stachoň, Kubicek 2021; Laksono, Aditya 2019; Keil et al. 2021). Vizualizace terénu je řešena pomocí webových technologií v (Herman, Řezník 2015)

Široké využití nachází 3D vizualizace a XR v případě urbánních prostředí a to v různých odvětvích např. urbánní plánování, architektura, meteorologie aj. Vizualizaci 3D city modelů napříč projekty shrnuje (Julin et al. 2018; Herman 2014). Koncept AR aplikace pro terénní urbánní plánování shrnuje (Cirulis, Brigmanis 2013). V oblasti meteorologie využívá 3D vizualizace (Gautier, Christophe, Brédif 2020; Gautier, Brédif, Christophe 2020), v kontextu plánování umístění větrných elektráren pak (Rafiee et al. 2018). V případě územního plánování se využitím 3D vizualizace zabývá (Judge, Harrie 2020). 3D webové vizualizace seismických hazardů infrastruktury využívají (Mazzei, Quaroni 2022). #TODO

V rámci územního plánování je VR 3D vizualizace často zmiňována v kontextu zvýšení participace veřejnosti na vývoji územního plánu. Autoři (Judge, Harrie 2020; Onyimbi, Koeva, Flacke 2018; Rzeszewski, Orylski 2021) považují 3D vizualizace za přínosné v tomto ohledu. Virtuální prostředí v kontextu geografie jsou často zmiňována i v oblasti výuky. Vývoj systému pro sběr a goevizualizaci dat v rámci virtuální reality představuje (Bernardes et al. 2018). Geovizualizace v rámci tohoto výzkumu spočívala ve vytvoření virtuálních prostředí univerzitního kampusu pomocí herních enginů (např. Unity, Unreal).

Důležitým aspektem vývoje pro webové prostředí je porozumění ekosystému techologií, které jej umožňují. #todo – Obecne info o tom jak funguje web (scope zjistit ze studentskych praci). Vývoj aplikací pro web zahrnující propojení s geoprostorovou informací se zabývá (Peňák 2017)

#TODO – rozdělit 3D a XR, dočíst víc článků kde: Web, XR

#TODO Usability and user testing

# Teoretické základy

V teoretické části je nutné objasnit podstatné pojmy a koncepty. Teoretická část se zabývá především tématikou virtuální reality, a to z pohledu koncepčního (obecného, komunikačního), inženýrského, popř. technického, ale i fyziologického (percepčního). Následně je prozkoumána oblast 3D modelování.

## Virtuální realita

Definovat koncept virtuální reality je obtížný úkol, převážně z důvodu, že se jedná o široký a z pohledu specifických technologií rychle měnící se pojem. Definice je navíc rozdílně interpretována napříč. obory, které se jí zabývají. Sherman a Craig definují virtuální realitu následovně:

Virtual reality: a medium composed of interactive computer simulations that sense the participant’s position and actions and replace or augment the feedback to one or more senses, giving the feeling of being mentally immersed or present in the simulation (a virtual world). (Sherman, Craig 2019)

Důležitým konceptem je pak také chápání virtuální reality jako zážitku (*experience*), jelikož virtuální realita je reálná až v případě, kdy jí někdo (Účastník) zažívá / vnímá. Jakožto zážitek definuje virtuální realitu i LaValle následovně:

Inducing targeted behavior in an organism by using artificial sensory stimulation while the organism has little or no awareness of the interference. (LaValle 2020)

V oblasti kartografie a českém prostředí je možné se setkat s definicí pak virtuální realitu popř. virtualitu v návaznosti na virtuální geografická prostředí (VGE) definuje MacEachren pomocí 4 I virtuální reality (MacEachren et al. 1999) a to:

1. Imerze
2. Interaktivita
3. Informační intenzita
4. Inteligence objektů

Definice Shermana a Craiga pohlížející na virtuální realitu více z pohledu zážitku stejně jako LaValle, je založena na 5 klíčových elementech:

1. Účastník
2. Tvůrce
3. Virtuální svět / prostředí
4. Imerze
5. Interaktivita

**Virtuálním světem** Sherman a Craig chápou kolekci objektů, pravidel a vztahů mezi objekty v prostoru. Jedná se tedy o jakýkoliv virtuální svět, který je prezentování **účastníkovi** skrze médium (způsob komunikace mezi účastníky) virtuální reality. V případě, že virtuální svět je vytvořen na základě reálného / geografického, je možné mluvit o virtuálním geografickém prostředí (VGE). **Imerzi** Sherman a Craig rozdělují na **mentální** a (stav zapojení do virtuální reality) **fyzickou** (stimulace senzorů). Dohromady imerzi pak definují jakožto: pocit bytí ve virtuálním prostředí. LaValle definuje stejný koncept pomocí termínu *Awareness:* tedy míru do jaké je uživatel oklamán, že je součástí virtuální reality. **Interaktivita** je podle Shermana a Craiga klíčovým prvkem k autenticitě virtuální reality. LaValle interakci konkretizuje pomocí toho, zdali **účastník** má vliv na virtuální realitu, a to na *open-loop* (nemá vliv) a *closed-loop* (má vliv). Míra interakce se liší na základě zvoleného média (technologie) pomocí které je virtuální realita vytvořena. Výše zmíněné koncepty je možné přímo překrýt s MacEachrenovy, kromě konceptu **informační intenzity** a **inteligence objektů,** a to především protože se tyto koncepty vztahují více k VGE nežli k obecnému konceptu virtuální reality. **Informační intenzitou** je myšlena míra abstrakce vytvořeného virtuálního prostředí od prostředí reálného (viz dále LOD a LOA). Inteligencí objektů se pak chápe míra do jaké jsou objekty ve virtuálním prostředí schopny interakce na základě různých vjemů (např. vzdálenost od účastníka aj.) (Stachon, Kubicek, Herman 2020).

Důležité je objasnit mimo definice i zužívanou terminologii. LaValle pod termín virtuální reality řadí termíny AR (*Augmented reality*), MR (*Mixed reality*) a XR (*Extended reality*). Tyto termíny jsou obecně vnímány jako distinktivní body na *virtuálním kontinuu* (Milgram, Kishino 1994). MR a XR jsou pak považovány za generalizace VR, AR a jiných termínů nacházejících se na virtuálním kontinuu. XR je považován za novější termín, který zaštiťuje ostatní více z pohledu technologického než koncepčního. Na konkrétní definice se názory napříč literaturou různí (Çöltekin et al. 2020b).

Někteří autoři rozlišují mezi termíny virtuální realita a virtuální prostředí. Termín virtuální realita se přesněji nevztahuje k napodobení reality (ale k zážitku, který se pro uživatele jeví jako reálný). Přestože slovo "realita" může vyvolat dojem napodobení skutečnosti, objevil se termín virtuální prostředí. Termín vznikl, protože s využitím vizualizačního prostředí lze také zobrazit fikční (nebo plánovaná) prostředí, a tak termín "prostředí" lépe zahrnuje rozsah činností, které lze v takovém vizualizačním prostředí provádět (Çöltekin et al. 2020a).

Do termínu virtuální reality LaValle zahrnuje i termín *virtual environments,* který je preferován v akademickém prostředí, v geografii tedy pak VGE .

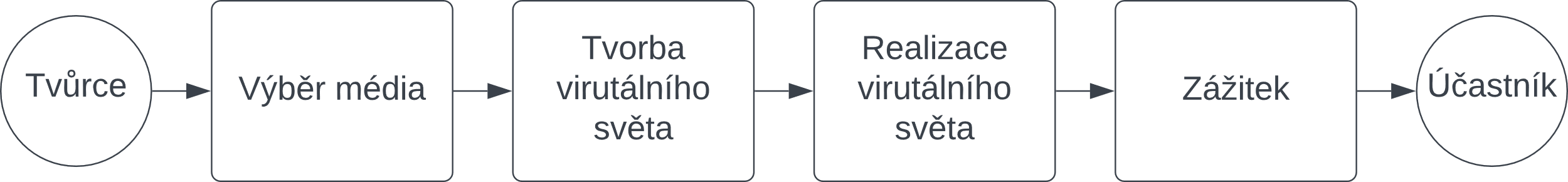
Dalším z pohledů na definování VR je dělení na základě míry imerze. Základním dělením virtuální reality podle míry imerze jsou kategorie (Riva 2006; Kvarda 2020; Burdea, Coiffet 2003):

1. Desktop VR
2. Teleprezence
3. CAVE
4. Imerzivní VR (VR)
5. Rozšířená realita (AR)
6. Smíšená realita (MR)

Kdy první dvě kategorie nejsou považovány za imerzní. Technologie CAVE umožňující projekci virtuálního světa na přímé fyzické okolí již za imerzní považovaná je. V případě VR, AR a MR se jedná kombinace práce s reálným a virtuálním světem. (Kvarda 2020; Burdea, Coiffet 2003) Záměrem této práce je primárně imerzní VR tedy systém zobrazující virutální svět v zobrazovacím zařízení (HMD). V rámci imerzivního VR je míra imerze určována především úrovní, do jaké umožňuje hardware a software naplnit tvorbu virtuálního prostředí, interaktivitu informační intenzity atd. Míra imerze tedy závisí na tom, jaké smysly jsou ovlivněny virtuální realitou. Tato schopnost je primárně ovlivňována kompetencí hardwaru tudíž je možné jej dělit dle použitých zobrazovacích zařízení (vizuální, zvykové, haptické). Terminologie následně obsahuje tedy termíny jakožto mobile VR, desktop VR a HMD – immersive VR (viz. kap. Zobrazovací zařízení).

### Komunikační medium

Virtuální realita je médium, tudíž je možné ji chápat jako formu mezilidské komunikace a dále zkoumat její vztah k dalším formám komunikace (Sherman, Craig 2019). V rámci kartografie je možné obdobné definice najít ve dvou teoretických koncepcích kartografie, a to v informační a komunikační teorii mapy, které byly rozpracovány již 60. letech minulého století (Kubíček, Stachoň 2009). Teorie kartografické komunikace představuje mapu jako prostředek komunikace, kdy tvůrce je „odesílatelem“ informace a čtenář příjemce (Kubíček, Stachoň 2009). Sherman a Craig tuto myšlenku představují obecněji na různých formách medií. Společný je však fakt, že se jedná o lineární proces (Koláčný 1969), kdy tvůrce myšlenky si vybere médium (film, mapa, virtuální realita atd. ), následně vytvoří virtuální svět (příběh, reprezentace prostoru na mapě, reprezentace prostoru v počítači), který nás ledě realizuje pomocí technologií příslušící danému médiu, čímž vytváří pro účastníka jedinečný zážitek (Sherman, Craig 2019).



Obr. 1 Základní model komunikace skrze médium. (vytvořeno podle: Sherman, Craig 2019)

Výše zmíněný model, však není možné zcela aplikovat v případě přidání konceptu interaktivity a vlivu účastníka na tvorbu zážitku. Stejná problematika se vyskytuje i v dalších názorech na teorii kartografické komunikace (Slocum 2014; MacEachren 2004).

Kubíček a Stachoň představují myšlenku rozšíření komunikačních možností mapy skrze nové technologie (web, aj.), pomocí tohoto rozšíření pak představují skutečnost, kdy účastník má mnohem větší vliv na tvorbu mapy (komunikačního média) (Kubíček, Stachoň 2009). V tomto případě autoři zkoumají interaktivní kartografické vizualizace ve webovém prostředí, skrze prizmat využití map podle (MacEachren, Taylor 1994). V případě této práce se jedná o obdobné zhodnocení, kdy je však medium mapy, jakožto medium komunikace prostorové informace, „nahrazeno“ médiem virtuální reality, popř. virtuálním geografickým prostředím.

### VR a kartografie

Kartografie v posledních 30 letech prošla tzv. „geoinformatizací“, kdy se od papírových map přešlo k digitalizaci a automatizaci analytických i vizualizačních procesů. Digitalizace dále umožnila nové způsoby interakce a dynamické práce s prostorovými daty, a to skrze geografické informační systémy GIS. (Konečný 2011) Vývoj virtuální reality přirozeně zasáhl i geoinformační vědy, kdy zpočátku vedl k tvorbě Desktop VR vizualizacím, tedy zobrazování geoprostorové informace v 3D prostředí. Následně pak nastal posun do Immersive VR, kdy byl uživatel přímo vnořen do prostředí vytvořeného na základě geografických dat (Kvarda 2020).

Obecný přehled témat v kartografii využívajících 3D prostředí a různých úrovní jejich vizualizace poskytuje (Herman 2019). Jedná se o: topografická data a analýz nad nimi, 3D katastr, dokumentace a uchování kulturního dědictví, virtuální turismus, výuka geografie, orientace a navigace v zastavěných oblastech, vizualizace v hydrologii, podpora při krizovém řízení, vojenské simulace, geologie a geofyzika, meteorologie a teplotní, hlukové, ekologické a hlukové studie urbánních prostředí, modelování budov a facility management.

**VGE**

Koncept VGE, zkratka pro virtuální geografická prostředí, představuje vývojový krok po dřívějších konceptualizacích jako "virtuální geografie." Tento termín byl poprvé formálně navržen na počátku 21. století a od té doby prošel významným vývojem. Moderní popis VGE je

D*igitální geografické prostředí, které je generováno počítači a souvisejícími technologiemi, které uživatelům umožňují zažít a rozpoznat složité geografické systémy a provádět komplexní geografické analýzy. Toto prostředí zahrnuje interakci mezi člověkem a počítačem, distribuované geografické modelování a simulace a síťovou geo-kolaboraci*. (Chen, Lin 2018)

VGE by mělo zrcadlit skutečné geografické prostředí ve virtuálním světě, a zároveň umožňovat uživatelům vizuálně vnímat a zkoumat analýzy v rámci virtuálního světa. VGE by tohoto měli dosáhnout skrze kombinaci tradičního geografického informačního systému (GIS) s technologiemi pro imerzní vizualizaci. (Çöltekin et al. 2020a)

VGE lze rozčlenit do čtyř hlavních komponentů (Lin, Chen, Lu 2013): **datový prostor**, **prostor pro modelování a simulace**, **prostor pro interakci** a **prostor pro spolupráci**. Data jsou v datovém prostoru organizována, manipulována a vizualizována, aby vytvořila digitální infrastrukturu pro VGE. Modelování a simulace jsou klíčovými prostředky pro moderní geografický výzkum, a VGE tuto technologii integrují. Interakce ve VGE vyžaduje odlišné myšlení než u desktopových počítačů, protože cílem je vytvořit zážitky srovnatelné se skutečným světem. Prostředí pro spolupráci umožňuje interakce mezi uživateli a je klíčem k řešení složitých geografických problémů pomocí spolupráce napříč různými oblastmi a odvětvími (Guo, Goodchild, Annoni 2020).

VGE je tedy možné chápat jako virtuální pracovny pro spolupráci na tvorbě analýz, vizualizací a následných interpretací nad geografickými daty. Tato práce bude zaměřena na určité aspekty datového prostoru, prostoru pro interakci a případě prostorou pro spolupráci. Cílem této práce není vytvořit kompletní VGE, ale představit možnosti a omezení současných technologií, které mohou být při budoucí tvorbě VGE využity.

**Digital Earth**

Digital Earth (dále jen DE) je popisována jako virtuální atlas (*globe* – ve smyslu celé země) sestavená z masivních dat pozorování Země s více rozlišeními, více časovými obdobími, různými typy dat o Zemi a spřízněnými analytickými algoritmy a modely (Goodchild 2013; Grossner, Goodchild, Clarke 2008; Guo, Goodchild, Annoni 2020). Z vědeckého hlediska má Digitální Země dvě základní aspekty. Zaprvé, Digitální Země představuje rozsáhlý systém dat a informací, který agreguje a prezentuje data a informace týkající se Země. Navíc je Digitální Země virtuálním systémem Země, který může provádět simulace systému a podporu rozhodování pro složité geovědní procesy a socioekonomické jevy (Guo, Goodchild, Annoni 2020). Z hlediska VGE se jedná o další abstrakci nad konceptem VGE.

Metaverse

Podobně jako v případě definice virtuální reality, i koncept Metaverse je obtížně definovatelný a jeho význam se mění v závislosti na perspektivě a kontextu. Existuje mnoho různých názorů a přístupů k tomu, co Metaverse skutečně představuje Jedním z aspektů, který ilustruje nejednoznačnost Metaverse, je různorodost definic a pohledů na tento koncept. Někteří ho vidí jako kolektivní termín pro digitální trojrozměrné světy, zatímco jiní vnímají Metaverse jako potenciální následující generaci internetu, která by mohla definovat Web 3.0 nebo se alespoň stát jeho součástí. Existují také představy o Metaverse jako o verzi internetu, kterým se člověk může procházet a „být v něm“ (Kiong 2022; Newton 2021). Dále je metaverse často spojován s MMORPG počítačovými hrami, jelikož koncept individuálních virtuálních světů umožňujících sociální interakce odpovídá představám o Metaverse. Autoři (Ritterbusch, Teichmann 2023) na základě systematického průzkumu literatury vytvořili definici:

Metaverse, spojení slov "meta" a "vesmír", popisuje (decentralizovaný) trojrozměrný online prostor, který je trvalý a imerzní, ve kterém se uživatelé zastoupení avatary mohou sociálně a ekonomicky účastnit, spolupracovat a být kreativní ve virtuálních prostorách oddělených od reálného fyzického světa.

Všechny výše uvedené termíny se v různých měřítkách snaží definovat koncept virtuálního světa vytvořeného pomocí současné technologie. Světa, který existuje paralelně se světem „reálným“ a je s ním oboustranně propojen, a to tak že z něj čerpá a zároveň jej zpětně ovlivňuje. Výše uvedené definice se zdají velice podobné a při pohledu z různých kontextů zaměnitelné. Pro tuto práci není důležité, zdali se výsledný virtuální svět jmenuje Digital Earth, Metaverse nebo VGE, ale zdali je možné k těmto vizím technologicky dospět.

## Systém virtuální reality

Z obecného hlediska popisuje systém virtuální reality Sherman a Craig a dělí jej na základní komponenty (Software, Hardware, Virtuální svět, Úživatel) viz. Obr. X. LaValle rozděluje systém virtuální reality na obdobné komponenty (Hardware, Software a Uživatel). Toto rozdělení je patrné i v případě (Coltekin et al. 2020), kde autoři využívají rozdělení na (Technologie, Design a Uživatel). Kvarda definuje virtuální realitu jako systém kombinující počítačově generovaný svět s rozhraním uživatel-počítač.

A screenshot of a computer screen

Description automatically generated

Obr. 2 Systém virtuální reality dle: upraveno dle: (Sherman, Craig 2019)

A diagram of a diagram

Description automatically generated

Obr. 3 Systém virtuální reality dle: upraveno dle: (LaValle 2020)

LaValle představuje koncept tzv. *virutal world generator,* komponenta, která vytváří alternativní prostředí (může být VGE). Následně pak pomocí komponenty displeje, který je specifický pro daný smyslový orgán je percepce reálného světa nahrazena světem alternativním. Zmíněný VWG (*virtual world generator*) je tedy softwarová komponenta, která vytváří „jiný svět“, jímž může být kompletně syntetický svět, záznam existujícího světa a vše mezi tím. Člověk pak vnímá daný svět skrze jednotlivé smyslové orgány. Proces převodu VWG na display se nazývá *rendering.* Úspěšným VR systémem se pak rozumí takový systém, který je schopný do určité míry nahradit reálný svět světem vytvořeným. (LaValle 2020)

### Hardware

LaValle dělí hardware na 3 kategorie a to: **displeje** (výstup), **senzory** (vstup) **a výpočetní jednotky** (*processing unit*). Specifický displej pro každý smyslový orgán, na který se daný systém soustředí. Nejdůležitějším je zrak, způsoby, jakými je tento smysl ovládán se liší na základě samotného hardwarového zařízení. V případě HMD se jedná o LED obrazovky s vysokým rozlišením nastavené blízko očí a zaostřeny skrze čočky. Klíčové pro vytvoření virtuálního zážitku je sledování polohy HMD v prostoru. Orientace je měřena pomocí IMU (*intertial measurement unit*), podrobněji pomocí gyroskopu a akcelometru. Další z klíčových vstupů sensorů je snímání okolí, části lidského těla nebo i celé postavy pomocí digitálních kamer a tzv. *depth* kamer využívající infračerveného záření. Mimo kamery pak součástí VR hardwaru jsou i mechanické vstupy jako klasické klávesnice, myš a jiné ovladače.

Výpočetní jednotka, je klíčová v případě *body-fixed* hardware. Hlavní dělení je tedy v tom, kde je výčetní jednotka, na které je VWG spouštěn, jestli v rámci displeje (HMD) či na externím počítači, popř. jiném zařízení. V případě této práce se nejčastějším případem pak ten, kdy výpočetní jednotka je součástí HMD.

### Software

LaValle zmiňuje, že v ideálním případě by bylo vhodné, aby existoval nějaký specializovaný *VR engine*, díky němuž by vývoj VR systémů nemusel obsahovat nízko-úrovňové problémy (integrace HMD, aj.). Právě odhalení vhodné kombinace softwarových technologií pro tvorbu VR systému ve webovém prostředí je jedním z cílů této práce. Více k tomuto tématu viz. (kap. Analýza technologií) Souhrn softwarových komponent potřebných pro vývoj virtuálního zážitku jsou zdůrazněny Obr. X. VWG dostává input z nízko úrovňových systémů, které vyjadřují, co uživatel dělá v reálném světe. Jedná se o vstupní zařízení určující především polohu, orientaci (HMD) a následně interakci v prostoru (klávesnice, myš, kontrolery). (LaValle 2020) Různé typy virtuální reality využívají různé vstupní zařízení (viz. dělení virtuální reality dle míry imerze kap. 4.1) tím pádem i schéma Obr.X nezobrazuje úplný výčet. V případě Imerzní virtuální reality, využívající primárně HMD a kompletně virtuální svět jsou vstupní zařízení z Obr. X považovány za hlavní.

A diagram of a virtual world generator

Description automatically generated

Obr. 4 Interakční diagram systému virtuální reality – upraveno dle: (LaValle 2020)

## Zobrazovací zařízení

Zobrazovací zařízení je možné klasifikovat dle míry imerze, kterou poskytují na ne-imerzní, semi-imerzní a plně-imerzní (Coltekin et al. 2020) (viz. Obr. X). Ne-imerzivní by neměly být považovány za zobrazovací zařízení pro virtuální realitu. Za semi-imrezivní jsou považovány často stereoskopické displeje, popř. monoskopické displeje, které zakrývají výraznou část zorné pole uživatele. Plně-imerzní jsou následně displeje, které kompletně vyplňují zorné pole uživatele. Plně imerzní v aktuální době jsou především HMD (*head mounted display).* Sherman a Craig dělí VR na 3 paradigmata, podle hardwaru, který zážitek zprostředkovává na: *hand based*, *stacionary* a *head mounted*. Nejrozšířenější terminologií pro tento hardware je *head mounted display* termín. Tyto displeje dosahují plného zaplnění zorného pole položením obrazovky velice blízko k očím. Lidské oko však není schopno ostřit na potřebně blízkou vzdálenost (cca 5–10 cm). HMD tedy využívají konvexní čočky položené do jejich fokální vzdálenosti. Díky tomuto se pak obrazovka jeví jako obrovský virtuální obraz, který je nekonečně daleko. (LaValle 2020)**.**

Diagram

Description automatically generated

Obr. 5 Dělení HMD, zdroj: (Coltekin et al. 2020) #TODO předělat do češtiny?

V případě mobilních tradičních displejů je možné mluvit o „případné“ imerzi, kterou je možné dosáhnout kombinace s nástavci umožňující pohled na obrazovku skrze čočky a umístění displeje do vhodné vzdálenosti od očí. Tato skutečnost není validní v případě klasických displejů, které zakrývají pouze omezenou část zorného pole. Výše zmíněné kategorie (Obr.X) jsou tedy v určitých případech propojitelné. Nutné však zmínit, že mobilní zařízení „vylepšené“ o nástavec na hlavu s čočkami se imerzí zdaleka nevyrovná speciálním HMD zařízením.

HMD systémy také musí počítat s různou délkou mezi zornicemi (*interpupillary distance – IPD*). Dalším z problémů je pak rozlišení obrazovky, které je potřeba aby nebylo možné rozeznat jednotlivé pixely. Na základě výpočtů založených na fyziologii lidského oka bylo zjištěno, že display by musel mít 16 000 x 16 000 px rozlišení na to, aby nebylo možné rozeznat pixely. Tento přístup je však velice výpočetně náročný tudíž, se aplikuje proces, kdy vysoké rozlišení je pouze tam kde je lidské oko aktuálně zaostřeno, k čemuž je však potřeba aby HMD implementoval tracking očí (LaValle 2020).

Tab. 1 Přehled rozlišení populárních HMD. sestaveno dle: (Takle 2022; Mehrfard et al. 2019)

|  |  |
| --- | --- |
| **HMD zařízení** | **Rozlišení na oko [px]** |
| Oculus Quest 2 | 1832 x 1920 |
| Valve Index | 1440 x 1600 |
| HTC Vive Pro 2 | 2448 x 2448 |
| PlayStation VR | 960 x 1080 |
| HP Reverb G2 | 2160 x 2160 |
| Samsung Odyssey G9 | 2560 x 1440 |
| Pimax 8K X | 1920 x 2160 |
| Apple Vision Pro | 3680 x 3140 |
| Pico 4 | 2160 x 2160 |

### Tracking

Důležitým aspektem hardware pro VR je *tracking* (Coltekin et al. 2020). Jedná se o získávání kontinuální informace o poloze a pohybu v rámci reálného světa je klíčovou součástí VR systému. Díky vývoji mobilních telefonů a zmenšení a vylepšení Inerciálních měřících jednotek (IMU – *Inertial measurement unit*) byl umožněn vývoj přesných metod pro snímání polohy (LaValle 2020). LaValle uvádí 3 hlavní kategorie toho co VR systém potřebuje snímat:

1. Smyslové orgány uživatele – převážně sledování pozice hlavy, popř. očí
2. Ostatní části těla – obličej, ruce aj.
3. Okolní prostředí – reálné objekty v okolí uživatele

Důležitým konceptem pro *tracking* je koncept DoF (*degrees of freedom –* stupně volnosti). DoF je specifický způsob jakým se může pohybovat objekt v prostoru. Pohyby je možné zjednodušit na rotaci či posun po dané přímce. Jakýkoliv objekt se v prostoru může pohybovat pomocí 6 DoF, tedy translací a rotací kolem X, Y, Z os (Sherman, Craig 2019) viz. Obr.X.

Diagram

Description automatically generated

Obr. 6 Stupně volnosti – *Degrees of Freedom* – DoF (zdroj: (Dupin 2016))

Tracking je dalším z vhodných kritérií pro kategorizaci HMD. Toto rozdělení je pak důležité především z hlediska vývoje VR aplikace, kdy je nutné v návrhu počítat se všemi variantami. Je možné je rozdělovat dle kritérií (A-Frame authors 2023) :

1. Kolik DoF (*degrees of freedom*) uživateli umožňují. Hlavní kategorie jsou 6DoF (rotační a poziční) nebo 3DoF (rotační).
2. Zda HMD jsou pouze display nebo jsou k nim přiřazeny i dodatečné ovladače. Následně pak kolik DoF tyto ovladače mají (2 – klávesnice a myš, 3 – rotační, 6 – rotační i poziční).
3. Zda výpočetní jednotka je stolní počítač, mobilní telefon, popř. samotný HMD.

Pro tuto práci je důležité dělení, zda se jedná o mobilní, samostatný nebo desktopový (nutné být připojený k PC nebo jiné výpočetní jednotce) HMD. Toto rozdělení je důležité primárně z hlediska analýzy kompatibility hardwaru a webových prohlížečů podporující VR obsah (viz. analýza Prohlížečů). Následně je pak toto rozdělení důležité z hlediska výpočetní síly jednotlivého hardwaru. Dalším z důležitých aspektů je pak dělení podle způsobu, jakým je řešen input v rámci HMD. Tedy jaké vstupní zařízení (klávesnice, myš, ovladače, hlas, aj.) HMD podporuje a do jaké úrovně input z daných zařízení je schopný zpracovat, tedy kolik DoF pro dané vstupní zařízení snímá a zpracovává.

## Percepce

/ uživatelZa účelem tvorby VR prostředí / zážitku je nutné znát způsob jakým lidský mozek interpretuje předanou informaci skrze smyslové orgány (LaValle 2020). V případě percepce je možné hovořit o počitcích, které jsou inicializované podněty ze smyslových orgánů. Více počitků pak tvoří vjem. (Chloupková 2007) Pro VR je klíčová percepce (vnímání) vzdálenosti a měřítka, pohybu, barvy a následně jejich kombinace (LaValle 2020).

### Percepce vzdálenosti

Percepce vzdálenosti má za úkol dle (Mather 2016) vyřešit 4 hlavní problémy jimiž jsou:

1. Stanovení pořadí objektů v prostoru
2. Stanovení intervalů mezi objekty
3. Stanovení absolutní vzdálenosti objektu od pozorovatele
4. Stanovení odhadu trojrozměrného povrchu a jeho tvaru

Za účelem dosažení těchto cílů využívá určitá vodítka, jelikož obraz na sítnici je dvojrozměrný. Vodítka je možné dělit na monokulární a binokulární na základě toho, zda jsou vnímána jedním či oběma očima. Dále je pak možné vodítka rozdělit na statická a dynamická. Při vnímání jsou tato vodítka kombinována. (Mather 2016; Chloupková 2007). Monokulární vodítka (viz. Obr.X) (Mather 2016; Chloupková 2007; Matatko, Bollmann, Müller 2011):

* **Interpozice** – překrývaný objekt je vnímán jako vzdálenější
* **Relativní velikost** – menší objekty jsou považovány za vzdálenější,
* **Vržený stín –** objekt vytváří stín na jiném povrchu / objektu
* **Stínování –** tvar objektu vytváří stín na sobě samém
* **Umístění v rovině obrazu –** objekt blíže horizontu je považován za vzdálenější
* **Gradient textury –** textura je s rostoucí vzdáleností hustší a jednotlivé prvky jí tvořící jsou menší

A diagram of different types of shapes

Description automatically generated

Obr. 7 Monokulární prostorová vodítka (upraveno dle: (Bogdanova, Boulanger, Zheng 2016))

Dynamická vodítka jsou pak **paralaxa pohybu** *–* kdy pohyb vzdálenějších objektů po sítnici oka je pomalejší (Chloupková 2007), **mizení (*deletion*)** a **přirůstání (*accretion*)** – při nepříčných pohybech se objekty ve různých vzdálenostech jeví, že se relativně pohybují jeden k druhému. Tento jev se nazývá "mizení", když objekt vzadu postupně mizí za objektem vpředu. Označuje se jako "přirůstání", když objekt vzadu vystupuje zpoza objektu vpředu (Matatko, Bollmann, Müller 2011).

Mezi binokulární vodítka se pak řadí: **binokulární disparita** – rozdílná poloha očí umožňuje vidět prostor z jiného úhlu, což dodává možnost vytvořit percepci vzdálenosti, **binokulární konvergence** – jedná se o vjem pohybu očí, kdy s blížícím se objektem se oči stáčí k sobě a se vzdalujícím naopak, mozek tedy tyto pohyby interpretuje jako změnu ve vzdálenosti objektu. (Chloupková 2007)

Znalost těchto procesů je klíčová pro tvorbu VR prostředí, jelikož může snadno dojít k neshodám v reálné velikosti či vzdálenosti objektů, tedy špatnému vnímání měřítka, kvůli špatné interpretaci prostorových vodítek. Příkladem neshody může být (*vergence accomodation mismatch*). Dalšími příčinami neshod je pak nedokonalý tracking hlavy uživatele, kdy výrazná latence působí opoždění zobrazení. Problematické je i když tracking sleduje pouze orientaci hlavy a tím pádem znemožňuje použití paralaxy pohybu. (LaValle 2020) zmiňuje fakt, že monokulárních vodítek by mělo při tvorbě virtuální prostředí být využíváno co nejvíce.

### Percepce pohybu

Percepce pohybu velice výrazně závisí na vizuálním vjemu. Většina soudobých HMD se soustředí primárně na vizuální vjem, tudíž neshody ve virtuálním prostředí mohou vést k nekorektním vjemům pohybu, což může vést k nevolnosti. Problém pro VR systémy tvoří iluze vlastního pohybu z důvodu vnímání pohybu vizuálně. Jedná se tedy o konflikt visuálního a rovnovážného aparátu nazvaný *vection.* Problém se vyskytuje často v případě akcelerace pohybu avatara ve virtuálním prostředí. V případě, kdy akcelerace je postupná dochází v mozku k detekování neshody ve vizuálních a rovnovážných (střední ucho) vjemech. Absolutní akcelerace / teleportace v transpozici i v rotaci je řešením pro tento problém, jelikož mozek vyhodnotí nárůst rychlosti jako extrémní případ a nestihne spustit reakci na něj (bolest hlavy, nevolnost).

*Retinal image slip* aneb problém kolik FPS (*frames per second*) je dostatečné pro VR display. VR display vyžaduje vyšší hodnoty FPS, jelikož je nutné vhodně upravit pohyb pozorovaného objektu ve virtuálním světě tak aby zůstal zaostřený i při pohybu hlavy. Je nutné zachovat tento objekt v jednom bodě na sítnici (VOR), tudíž v rámci virtuálního světa je nutné, aby se tento fixovaný objekt posunul po obrazovce opačně od pohybu hlavy. Z důvodu nedostatečné hodnoty FPS je obraz objektu na obrazovce příliš dlouho a uživateli se pak jeví jako přeskakující („*judder“)* namísto plynule se pohybujícího. Jelikož vysoké FPS hodnoty jsou výrobní problém je *retinal image slip* řešen skrze *low persistence* přístup. Kdy je obraz objektu zobrazen jen v dané intervaly, které stačí očním receptorům na zaznamenání obrazu. Pro příklad moderní HMD Oculus Quest 2 umožňuje hodnoty FPS až 120Hz. (LaValle 2020)

### Význam pro tvorbu VR prostředí

V případě, že nejsou všechny smyslové vjemy nahrazeny virtuálními vstupy nebo pokud vstupy nejsou dokonalé (nejsou v konfliktu s lidskou fyziologií) dochází ke konfliktům vnímání. Nejvíce problematickým se dlouhodobě jeví vekce a to konflikt mezi vizuálními a rovnovážnými vjemy. Dalším z častých problémů je konflikt ve výšce uživatele (např. v sedě) a avatara v rámci virtuálního světa. Navíc k nesouladům mezi smysly přispívají i nedokonalosti v hardware, software, obsahu a rozhraních VR, což způsobuje nesoulad s reálnými zkušenostmi. Tyto konflikty pak vedou ke špatným či nechtěným interpretacím, popř. k nevolnosti a únavě. (LaValle 2020)

## 3D modelování koncepty a principy

### Level of Detail, Level of Realism, Level of Abstraction

LOD (*level of detail*) je široce využívaná technika v oblasti počítačové grafiky, GIS a geoprostorové vědy. Cílem je dosáhnout vyváženého poměru mezi vizuální kvalitou a výkonem prostřednictvím přizpůsobení úrovně detailu na základě vzdálenosti objektu nebo scény od pozorovatele. V počítačové grafice se LOD používá k optimalizaci renderování pomocí dynamického přepínání mezi různými reprezentacemi objektu nebo scény (Obr. X). S rostoucí vzdáleností pozorovatele od objektu se používají verze s nižším stupněm detailu, což snižuje výpočetní nároky a zlepšuje rychlost renderování. Nižší stupně detailu mohou být dosaženy sémantickým zjednodušením (3D modely měst – CityGML) nebo algoritmickým (menší počet vertexů). Tímto je umožněno *real-time* renderování složitých scén nebo velkých datových sad, což jsou klíčové požadavky pro tvorbu úspěšné virtuální reality. V GIS techniky LOD pomáhají spravovat tato data prostřednictvím automatického přizpůsobování úrovně detailu na základě prostorového kontextu nebo úrovně přiblížení uživatele. V případě prostorových věd je pak možné mluvit o generalizaci. V některých případech však tento přístup není zcela vhodný viz. (Obr. X) z nějž je patrné, že aplikovaný LOD přístup na data DMT vede k tomu že budovy (hrad Petrov) jsou při pohledu z dostatečné vzdálenosti nevhodně zobrazeny nad zjednodušeným terénem. Případně řešení tohoto problému pak poskytuje práce (Semmo, Döllner 2014), kde autoři navrhují interaktivní změnu LOA dle akcí uživatele. (#todo vysvetlit frustrum culling)

V kontextu kartografie je problematika v konfliktu s konceptem měřítka, jelikož v tradiční 2D kartografii je jednoznačně možné říct jaké měřítko jaká vizualizace (mapa) má, kdežto v případě 3D map či virtuálních prostředí se odborná literatura není schopná shodnout zdali je koncept měřítka aplikovatelný, jelikož je nutné brát v potaz zobrazené území, LOD, míru přiblížení a následně tedy i jejich změnu v případě interakce. (Bandrova, Bonchev 2013)

A picture containing origami

Description automatically generated with medium confidence

Obr. 8 Příklad konceptu sémantického LOD v případě specifikace CityGML – nahoře; v případě redukce vertexů – dole. (převzato z: (Biljecki, Ledoux, Stoter 2016) a (Ghulam et al. 2013))

A picture containing sky, building, outdoor, stadium

Description automatically generated

Obr. 9 Snímky obrazovky z aplikace 3D model města Brna. Hrad Petrov pohledu ze směru Vila Tugendhat – Petrov. vlevo – terén je vykreslován v plném rozlišení; vpravo – terén je vykreslován zjednodušeně, model hradu je posazen nad terénem. (KAM Brno 2023)

Jako důležitou problematiku zmiňuje (Coltekin et al. 2020) míru abstrakce v návrhu virtuálních prostředí. Obecně je snaha dosáhnout co nejvíce realistické vizualizace. Ta je však nutná překonat problémy náročnosti zpracování množství dat a jeho vykreslení za předpokladu udržení nízké latence, vysokých hodnot FPS a dostatečného rozlišení. Díky této problematice je nutné využívat LOD a LOR přístupy (Coltekin et al. 2020). Při zanedbání některých z těchto aspektů v návrhu vizualizace se pak jedná o snížení míry imerze.

A close-up of a diagram

Description automatically generated

Obr. 10 Vztah LOR a miry imerze. Coletkin 2016 #todo - citovat

Další z problematik je pak tvorba virtuálního obsahu. Vytvoření obsahu s vysokým LOD a LOR zahrnuje řadu komplexních operací (Coltekin et al. 2020). Za hlavní úskalí se považuje kombinace množství vstupních dat (LiDAR, tomografie, sterofotogrametrie aj.), manuální práce při samotném modelování jako např.: segmentace textur od povrchů, tvorba topologicky správný povrchů, fyzikální simulace aj. Z hlediska této práce je klíčový výběr vstupních dat uskutečnit tak, aby potřeba výše zmíněných kroků byla minimalizována, popř. ošetřena již existujícími řešeními.

### Datové modely a formáty

Pokud má virtuální realita zobrazovat realitu skutečnou, a to v různých úrovních abstrakce, je pravidlem, že data 3D scén jsou často velice obsáhlá, V případě, kdy se vizualizace pohybuje v prostředí internetu je velikost a hlavně rychlost načítání dat významným faktorem. Je proto nutné pečlivě vybrat datový formát. Kritéria výběru formátu závisí primárně na podpoře ve webovém prostředí, možnosti přenosu geografických dat, možnosti uchovat informaci o geolokalizaci (lat, lon), interoperabilitě s jinými formáty (např. zdali je přístupná transformace z jiných vstupních formátů), zda se jedná o proprietární či otevřený formát, k jakému účelu je formát primárně určen a jak moc je formát aktuální (do jaké míry je využíván). Jelikož je možných formátů pro 3D geografickou vizualizaci mnoho budou pro analýzu budou vybrány pouze relevantní pro tuto práci. Z nich pak budou vybráni kandidáti pro tvorbu pilotní aplikace, kteří budou podrobněji popsáni.

Tab. 2 Seznam relevantní datových formátů umožňující 3D vizualizace. #todo – hodně zdrojů

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Formát dat** | **Použití** | **Notace** | **Otevřenost** | **Web** |
| 3D Tiles | Web GIS | JSON / Binární | Open Source | Ano |
| i3s (I3S Scene Layer) | Web GIS | JSON / Binární | Open Source | Ano |
| slpk (Scene Layer Package) | Web GIS | Binární | Open Source | Ano |
| KML (Keyhole Markup Language) | Web GIS | XML | Open Source | Ano |
| GeoJSON | Web GIS | JSON | Open Source | Ano |
| CityJSON | WebGIS / Urbanismus | JSON | Open Source | Ano |
| CityGML | Urbanismus | XML | Open Source | Ano |
| IFC (Industry Foundation Classes) | Modelování staveb (BIM) | Binární | Open Source | Ne |
| Shapefile - Polygon Z / Multipatch | GIS | Binární | Proprietární (ESRI) | Ne |
| DWG (AutoCAD) | CAD | Binární | Proprietární (AutoDesk) | Ne |
| Collada | 3D Grafika a VR | XML | Open Source | Ano |
| OBJ (Wavefront) | 3D Grafika a VR | Text | Open Source | Ano |
| glTF (GL Transmission Format) | 3D Grafika a VR | JSON, Binární (glb) | Open Source | Ano |
| X3D | 3D Grafika a VR | XML | Open Source | Ano |
| VRML (Virtual Reality Modeling Language) | 3D Grafika a VR | Text (VRML), XML (X3D) | Open Source (X3D) | Ne |
| netCDF (Network Common Data Form) | Vědecká data | Binární | Open Source | Ne |
| HDF5 (Hierarchical Data Format) | Vědecká data | Binární | Open Source | Ne |
| FBX (Filmbox) | 3D Modelování a Animace | Binární | Proprietární (Autodesk) | Ne |
| PLY (Polygon File Format) | 3D Grafika a Vizualizace | Binární | Open Source | Ano |

V Tab.X Sloupec „web“ udává, jak často daný datový formát nalézá uplatnění na internetu v současném kontextu. Sloupec indikuje, zda webové využití formátu je omezené, popř. méně běžné vzhledem k modernějším technologiím a standardům. Toto dělení je utvořeno na základě autorovy znalosti není tedy výsledkem exaktního výzkumu, tudíž by nemělo být bráno jako stoprocentně směrodatné.

Formát **gltf** přezdívaný *JPG pro 3D*, jedná se o otevřený formát vytvořený skupinou Khronos. Jedná se o formát určený pro sdílení 3D scén. Může být ve dvou formách – jakožto binární balík *.glb* nebo jako JSON soubor *.gltf* indexující připojené binární soubory (atributy - *.bin,* textury - *.jpg, .png. .webP*). Formát je podporovaný ve většině WebGL knihoven, grafických softwarů a nástrojů pro konverzi, kompresi atd. V kontextu geoprostorových dat, gltf obsahuje tzv. geoprostorový profil. Jedná se o standardizovaný způsob jak umožnit glTF streamování obsáhlých terénních dat s texturami, bodových mračen a CAD modelů a aby bylo možné propojit metadata (atributy) s geometrií.

<https://www.youtube.com/watch?v=e9Ont3uJYa0>

Pro velké objemy primárně geografických dat v 3D scénách vytvořila firma Cesium formát 3D Tiles. Jedná se o otevřený formát a OGC standard. Formát je vytvořen na základě glTF specifikace. Hlavní předností je hierarchický LOD přístup, kdy data jsou definována ve stromové struktuře, kde koncové nódy mají maximální rozlišení a každý rodič je zjednodušenou verzí svých dětských nódů. Tento přístup tedy umožňuje streamovat pouze data potřebná pro dané zobrazení. 3DTiles formát sám o sobě určuje způsob jakým rozdělit 3D model do objemových dlaždic, kdy každá dlaždice odkazuje na glTF. V rámci glTF je pak zakódována samotná geometrie, textury, komprese, identifikace prvku a metadata. (Geospatial Webinar 2023) Obdobným formátem jako 3D Tiles je I3S/SLPK (*Indexed 3D Scene Layers*), formát podporuje sdílení 3D objektů, povrchových síti s texturami, bodová mračna aj. Formát primárně vytvořen a využíván v Esri technologiích a zároveň OGC standard. (OGC 2023)

## Komponenty Virtual World Generator

### Scéna

* Graf Scény – viz. Three.js, Blender aj.
  + Renderer, scéna, Kamera, Mesh, Materál (textura), Osvětlení

### Zobrazení

* Virutální kamera
* Způsob promítání scény
* Furstrum
* Culling
* Rendering pipeline

### Pohyb

* DoFs
* Transformace
* Kamery
* Controlery

### Osvětlení

* Spot, Directional, Ambient

# Analýza technologií

Způsob výběru technologií vhodných pro prezentaci geografických dat na webu ve virtuálních prostředích je možné rozdělit podle oboru v jakém daná technologie primárně figuruje. Logické je začít průzkumem exitujících GIS řešení, které tuto funkcionalitu splňují. Dalším oborem je následně herní vývojářství (tedy technologie herních enginů), následně pak webová řešení tedy zpravidla JavaScript knihovny nad WebGL. Nutno zmínit, že výše zmíněné rozřazení není exaktní, ale v mnoha případech se překrývá, popř. doplňuje, čímž je myšleno, že pro vizualizaci dat na webu ve virtuální realitě je potřeba souhra více technologií, které umožní pořízení dat, úpravu dat, vizualizaci, interakci a následně publikaci. Nejedná se tedy o jednotlivou technologii, ale souhru více tzv. *tech stack*. Na základě této skutečnosti je tedy nutné hodnotit i vzájemnou kompatibilitu jednotlivých technologií, což může přinést výraznou míru komplexity, jelikož je nutné technologie na různých úrovních kombinovat. Za účelem získání reprezentativních výsledků je nutné hodnotit vhodnost jednotlivých technologií v *tech stacku* v kontextu specifického využití. V případě této studie se jedná o využití v rámci územního plánování. Do výběru technologie by měli vstupovat určité funkční a nefunkční požadavky. Za účelem výběru technologie je nutné popsat charakteristiky existujících technologií, aby bylo možné je kategorizovat a následně vybrat správnou konfiguraci technologií pro daný účel.

## Taxonomie technologií

# QST – dát pryč?

Jedním z možných pohledů na klasifikaci vizualizačních technologií poskytli (Bostock, Heer 2009). V rámci své práce hodnotí vizualizační technologie na základě tří charakteristik, jimiž jsou

1. Expresivita – Jaké možné vizualizace daná technologie umožňuje?
2. Účinnost – Jak dlouho zabere vytvoření vizualizace?
3. Přístupnost – Jak náročné je vytvořit vizualizaci bez předchozí znalosti dané technologie?

Bostock a Heer hodnotili technologie pro vizualizaci dat obecně, přístup je však aplikovatelný na konkrétní výběr technologií omezený na geoprostorová data. V případě technologií pro tvorbu virtuálních prostředí / vizualizací (Çöltekin et al. 2020b) kategorizují dle 3 kritérií (technologie, návrh a lidské faktory).

Dalším z kategorizačních kritérií pro popis technologií je úroveň detailu, do jaké umožňují uživateli tvořit danou vizualizaci. V tomto případě je vhodné rozlišit termíny softwarové *knihovny* a *frameworky.*  V případě knihoven se jedná o hotové implementace pro řešení konkrétních problémů, kdežto frameworky jsou sadou knihoven nástrojů a vývojových vzorů / přepisů pro usnadnění vývoje aplikace. V případě 3D grafiky lze pak představit termín *game / virutal engine*, které ve většině případech umožnují tvorbu virtuálních interaktivních prostředí prostřednictvím GUI (*graphical user interface*) a představují komplexní řešení. Aktuálně herní enginy jsou hlavním nástrojem pro tvorbu virtuální reality.

Dalším dělení je na webové aplikace a nativní software. Za nativní software – vyvinutý pro daný operační systém a jehož runtime prostředí je specifické pro daný hardware a operační systém – je možné považovat klasické GIS řešení (QGIS, ArcGIS, GRASS aj.), aplikace pro tvorbu 3D grafiky (Blender, SketchUP, Microstation) a herní enginy (Unity, Unreal Engine, Godot, Wonderland). Webový software, tedy software, jehož runtime prostředí je buďto v rámci klienta, tím pádem v prohlížeči uživatele nebo v rámci serveru. Pro dosažení daného případu užití je v mnoha případech využíváno technologií napříč všemi zmíněnými kategoriemi. Zde je nutné zmínit, že pro vývoj výsledné webové vizualizace neznamená využití pouze webových technologií. Tento fakt je prominentní především při přípravě geoprostorových dat.

A close-up of a website

Description automatically generated

Obr. 11 Taxonomie technologií umožňujících vykreslení 3D grafiky na webu. Upraveno dle: (Khronos Group 2018)

Diagram

Description automatically generated

Obr. 12 Taxonomie webových technologií umožňujících tvorbu virtuálních prostředí. zdroj: (Godber 2022) – #todo dodělat o vlastní – předělat na vlastní relevatní

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Obr. 13 Taxonomie webových technologií umožňujících tvorbu virtuálních prostředí. zdroj: (Godber 2022) – #work in progress

Obr. X a Obr. X podávají obecný přehled o ekosystému technologií, kterých je třeba pro vykreslování 3D grafiky a tvorby virtuálních prostředí na webu.

### Kategorizace pro webový vývoj

Pokud chce člověk vyvíjet VR pro web má možnosti:

1. Přímý vývoj nad WebGL a WebXR
2. JS framework / knihovnu pro WebXR
3. Export do WebGL skrze herní engine
4. WebXR engine - wonderland

**JS Frameworky a knihovny**

Three.js, react-three-fiber, babylon.js, ar.js

## Webový vývoj

Volba webového prostředí přináší jisté benefity, ale i překážky při tvorbě VR aplikací. Primárním benefitem webové vizualizace je dostupnost (*availability*) a přístupnost (*accesability)* oproti desktopovým aplikacím. Jelikož web je platformě a hardwarově agnostický, tedy je možné k němu přistupovat takřka skrze veškerý běžně užívaný hardware a software. V případě 3D vizualizace a virtuální reality je dostupnost a přístupnost v posledních letech umožněna díky výraznému vývoji HTML5, WebGL a WebXR technologií. Dalším z benefitů je fakt, že většina globálně užívaných aplikací se postupně přesouvá z desktopových řešení do webového prohlížeče (kancelářské programy: Microsoft Office Suite, grafické: Figma, Canva, vývojářské: CodePen, VSCode web aj.) (Řeháček 2020).

Tvorba klasických webových aplikací je umožněna pomocí kombinace technologií tzv. *web-standard technologies* (Řeháček 2020) jimiž jsou:

1. HTML – značkovací jazyk určující strukturu a obsah webové stránky
2. CSS – kaskádový stylovací jazyk určující vzhled obsahu stránky
3. SVG – značkovací jazyk umožňující 2D vektorovou grafiku na webu
4. JavaScript – vysokoúrovňový jazyk umožňující interakci s obsahem a vzhledem

Mezi webové standardy je pak volněji možné zařadit i klíčové API (DOM, Fetch API, WebGL, WebXR aj.), které umožňují snazší vývoj pro webové prostředí.

### Web APIs

DOM API

Při zpracování HTML dokumentu prohlížečem vzniká abstraktní stromová datová struktura, která slouží k vykreslení webové stránky. Tato struktura je následně přístupná skrze rozhraní nazývané *Document Object Model* (DOM) (Řeháček 2020). DOM reprezentuje daný HTML dokument tak, že umožňuje manipulaci s jeho strukturou, stylem a obsahem pomocí skriptovacího jazyka, například JavaScriptu (MDN Contributors 2022a). ). Z hlediska HTML je to objektový model, který definuje atributy, metody a události. Z hlediska JavaScriptu jde o API, které umožňuje interakci s HTML dokumentem.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Obr. 14 Zdrojový kód HTML a DOM struktura. upraveno podle: (Řeháček 2020; W3Schools 2023)

WebGL API

Jedná se o nízko úrovňové Javascriptové aplikační rozhraní, které umožňuje vysoko výkonnostní vykreslování interaktivní 3D a 2D grafiky v rámci kompatibilního webového prohlížeče. Díky tomu, že WebGL následuje implementaci OpenGL ES (*OpenGL for Embedded Systems[[1]](#footnote-1)*) je možné v rámci webových stránek využívat výpočetní síly grafických karet v zařízení uživatele (MDN Contributors 2022b). WebGL je přístupné skrze HTML5 Canvas element. Důležité je, že je to nativní součást prohlížečů, a proto nevyžaduje žádné další doplňky (Khronos Group 2023). Pro vykreslování využívá WebGL jazyk GLSL, který popisuje způsob, jakým je daný objekt vyobrazen (*shader*). Základní funkčnost WebGL dále rozšiřují JavaScriptové knihovny (viz. kapitola X), jež zjednodušují složitý proces grafického vykreslování přes jednodušší API. Od roku 2011, kdy byl WebGL poprvé zaveden, umožnil přímý přístup k GPU prostřednictvím JavaScriptu, a v roce 2013 byla představena verze WebGL 2. Dodnes zůstává standardním prostředkem pro zobrazování složitější grafiky na webu.

WebXR API

WebXR je specifikace definovaná v rámci W3C skupinou pro imerzní web, za účelem poskytnutí jednotné komunikace mezi VR a AR hardwarem a webovým prostředím. Jedná se o hardware agnostické imperativní API, které umožňuje jednotný přístup k vytváření virtuálních zážitků promobilní i desktopový VR hardware. WebXR API je založeno na OpenXR[[2]](#footnote-2) specifikaci skupiny Khronos. Hlavními body zájmu WebXR API je detekce a vyhledání možností daného HW a následně správné zobrazení obsahu v rámci HW (Immersive Web Working Group 2023; tro to WebXR and A-Frame Part 1 2021). WebXR podpora v rámci prohlížečů je tedy klíčová v případě hodnocení přístupnosti.#TODO – dodělat popsat jednodušeŽivotní cyklus VR aplikace spočívá v:

WebGPU API

WebGPU je dalším krokem v evoluci webových grafických API, tedy zamýšleným následníkem WebGL. Jedná se o experimentální aplikační rozhraní, které umožňuje vysoko výkonnostní 3D a 2D vykreslování na webu. WebGPU je nízkoúrovňové API, které poskytuje programátorům přímý přístup k hardwarové akceleraci na grafických kartách. Rozdílné od WebGL, které pro přístup k GPU využívá OpenGL ES APIs (Introducing WebGPU 2023). Jedná se o technologii ve vývoji, tudíž podpora mezi prohlížeči je velice omezená. Momentálně je WebGPU podporováno jen v nových verzích Chrome, Edge and Opera (Can I Use 2023b).

### Prohlížeče

Webové prostředí je široký a různorodý ekosystém technologií. Za účelem vývoje úspěšné aplikace je nutné zohlednit aspekt kompatibility dané aplikace s webovým prohlížečem (*runtime aplikace*). Kompatibilita je zajištěna tak, že verze daného prohlížeče podporuje jazyky, knihovny a frameworky použité při vývoji aplikace. V případě virtuální reality je klíčová podpora WebGL API a WebXR API. Za účelem porovnání je vhodné mít přehled o aktuálních webových prohlížečích.

Prohlížeče je možné rozdělit podle platformy pro kterou jsou implementovány. Tradiční dělení je na (desktop, mobilní) v případě VR je nutné brát v potaz i prohlížeče vyvinuté speciálně pro HMD (*Wolvic, Meta Oculus Browser*). Analýza podpory prohlížečů pro WebXR API viz. Tab. X. V rámci tabulky jsou zahrnuty prohlížeče, které implementují WebXR API. Nutné zmínit, že tabulka neobsahuje prohlížeče specializované na AR (*Magic Leap Helio*). Pro podporu WebGL není nutná podrobná analýza, jelikož všechny zmíněné prohlížeče v Tab. X plně podporují WebGL 1.0 a WebGL 2.0 (Can I Use 2023a). Podpora WebXR není tak rozšířená, tudíž přehled je zobrazen v Tab.X.

Tab. 3 Podpora WebXR Device API ve verzích vybraných prohlížečů. – 1WebXR Device API je velice rozsáhlé API, které je stále ve vývoji, tudíž není možné přesně určit míru podpory, 2Prohlížeče API nepodporují defaultně, 3Globální zastoupení prohlížečů na trhu - (k datu: 28.1.2023), sestaveno podle: (StatCounter 2023; Meta 2023; W3C 2023; Can I Use 2023c; Igalia SL 2023)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Prohlížeče** | | **Částečně1** | **Nutné povolit2** | **Zastoupení [%]3** |
| Desktop | Chrome | 79.0 - 112.0 | - | 22.71 |
| Edge | 79.0 - 109.0 | - | 4.17 |
| Safari | - | 13.0 - 16.2 | 3.12 |
| Firefox | - | 77.0 - 111.0 | 3.05 |
| Opera | 66.0 - 92.0 | 52.0 - 65.0 | 0.70 |
| IE | - | - | 0.73 |
| Mobilní | Chrome - Android | 109.00 | - | 41.54 |
| Samsung Internet | 12.0 - 19.0 | - | 3.20 |
| Opera Mobile | 72.00 | - | 0.01 |
| Firefox for Android | - | 107.00 | 0.29 |
| Safari | - | - | 14.67 |
| WebXR Viewer (IOS) | 1.0 - 2.0 | - | - |
| HMD | Wolvic | 0.9.5 - 1.2 | - | - |
| Meta Quest Browser | 5.0 - 16.2 | - | - |

## Specifikace požadavků pro technologie

Obecnou metodikou využívanou v softwarovém inženýrství je specifikace uživatelských požadavků na výslednou aplikaci. Hodnocení technologie pak tedy závisí na tom, zda umožňuje dosažení definovaných požadavků. Metodika specifikace požadavků byla převzata z práce (Herman 2014) a modifikována pro účel hodnocení aplikací umožňující tvorbu virtuální reality.

### Funkční požadavky

Jedná se o formulace služeb / funkcí, které by měl systém poskytovat, specifikaci reakcí systému na dané vstupy a chování systému v daných situacích. V některých případech se funkční požadavky rovněž zaměřují na explicitní definici činností, jež by systém neměl vykonávat. (Sommerville 2016)

**Orientace ve scéně**

Pro úspěšnou tvorbu VR aplikace je nutné, aby technologie podporovala především způsob pohybu a orientace na základě trackingu polohy a orientace zobrazovacího, popř. vstupního zařízení.

**Pohyb scénou**

Technologie by měla podporovat různé možnosti pohybu 3D scénou. Měla by podporovat poziční *tracking*, tedy proporčně převádět relativní polohu zobrazovacího zařízení od počáteční polohy v rámci virtuálního prostředí. Ve VR prostředí je dále běžným požadavkem možnost zrychleného pohybu nejčastěji pomocí teleportace skrze ukazovací paprsek. Technologie by měla podporovat způsoby pohybu pro různé typy vstupních zařízení (klávesnice, myš, kontrolery, aj.)

**Zobrazení**

Technologie by měla umožňovat zobrazení na úrovni imerze jak Desktop VR tak Immersive VR. Tedy pokud uživatel přistoupí k výsledné aplikaci pouze skrze tradiční display, měl by být schopný aplikaci používat stejně jako, když přistoupí pomocí HMD.

Geoprostorová data

Technologie by v ideálním případě měla nativně podporovat geoprostorová data. Měla by mít možnost prostorové geolokalizace.

### Mimo-funkční požadavky

Jedná se o omezení služeb nebo funkcí, které systém nabízí. Zahrnují časová omezení, omezení vývojového procesu a omezení stanovená normami. Nefunkční požadavky se často vztahují na celý systém, spíše než na jednotlivé funkce nebo služby systému. (Sommerville 2016)

**Cena**

Cenu vývoje je možné definovat pomocí nákladů časových, finančních. Pomocí nich lze následně hodnotit jednotlivé technologie, a to skrze finančních nákladů na použitý software (desktopová řešení) a data. (Herman 2014) Ačkoliv je v poslední době i v ČR sentiment zpřístupňování dat bez poplatků, 3D data jsou v mnohých případech stále proprietární záležitostí. (ČÚZK 2023) Časové náklady je primárně pracnost vývoje aplikace pomocí dané technologie. (Herman 2014)

**Dokumentace**

Technologie by měla mít extenzivní a srozumitelnou dokumentaci za účelem snadného vývoje.

**Výkonnost**

Technologie by měla dosahovat dostatečného výkonu, tak aby byla schopná vykreslovat dostatečné množství snímků, aby nedocházelo k snížení imerze. Tento požadavek je poměrně těžké hodnotit u samostatných technologií, jelikož závisí nejen na softwarovém řešení, ale často více na hardwarovém zařízení, popř. na platformě (prohlížeči). Jedním z konkrétních východisek pro výběr technologie je skutečnost, že technologie musí být založena na WebGL.

#todo – jak budu měřit, standardní scéna s povrchem budovou a nějakým objemem tematickým?

**Přístupnost**

Technologie by měla umožňovat přístup z co možná nejvíce zobrazovacích (výstupních) zařízení. V tomto případě se jedná o kombinaci podpory technologie v rámci webových prohlížečů a zároveň podpory těchto prohlížečů na vybraných hardwarových zařízeních.

**Kompatibilita**

Kompatibilita je v tomto případě úzce spjata s přístupností. Jedná se o množství podporovaných (kompatibilních) vstupních zařízení. Technologie by teda měla podporovat běžná vstupní zařízení`. #todo - specifikovat

**Interoperabilita**

Technologie by měla podporovat interoperabilitu mezi dalšími systémy, měla by být tedy dostatečně modulární pro její použití spolu s dalšími technologiemi. Interoperabilita v případě geoprostorového kontextu je také na úrovni dat, tedy technologie by měla podporovat standardizované formáty dat a přístupů k jejich zpracování, popř. konverzi.

**Imerze**

Technologie by měla podporovat Imerzní VR, tedy možnost vizualizace skrze HMD zařízení. Technologie by měla podporovat WebXR.

## Popis technologií

### GIS v kontextu webového vývoje

Jelikož je práce zaměřena na geoprostorová data, je logické prozkoumat možnosti tvorby virtuálních prostředí, které poskytované běžnými GIS. Primárním zaměřením GIS je především manipulace, analýza a následně 2D neimerzní neinteraktivní vizualizace dat. Je však možné nalézt implementace, popř. rozšíření / kombinace s jinými technologiemi, které umožňují vizualizaci dat ve virtuálních prostředích.

Proprietární řešení

Z proprietárních řešení je vhodné zmínit ESRI řešení, jakožto největšího dodavatele GIS softwaru. V rámci desktopového softwaru ArcGIS Pro je možné dosáhnout úrovně Desktop VR, tedy interaktivní zobrazení a analýzy nad 3D modely. Možným řešením pro tvorbu urbánních virtuálních prostředí je software Esri City Engine, který je primárně určen pro modelování a vizualizaci městské infrastruktury a zástavby. V případě propojení s externím softwarem poskytuje ESRI možnost propojení s herními enginy Unity a Unreal Engine skrze poskytované SKD (*Software Development Kit*) (ESRI 2023c). V případě virtuální reality na webu pak umožňuje ESRI publikaci 3D scén z ArcGIS Pro na ESRI cloud řešení ArcGIS Online, které umožňuje prohlížení daných scén, stále ale na úrovni neimerzní VR. Na základě takto publikovaných scén je následně možné vyvíjet webové aplikace s přidanou funkcionalitou pomocí ArcGIS JS API (ESRI 2023a; KAM Brno 2023). Immersive VR úrovně lze dosáhnout využitím City Engine, který umožňuje export sady 360° snímků z daného 3D modelu na ArcGIS Online a prohlížení těchto snímků z prostředí prohlížeče a stereoskopického HMD zařízení. (ESRI 2023b; Plačková 2022) Tato funkcionalita však neumožňuje pohyb scénou, jelikož se jedná pouze o snímky. Mezi proprietární řešení je následně možné zařadit i řešení společnosti Hexagon a to primárně LuciadRia JS API, což je univerzální API pro vizualizaci dat v prostředí prohlížeče pomocí WebGL (Hexagon 2023). Stejně jako u ESRI řešení neposkytuje Hexagon imerzní VR funkcionalitu. V rámci této práce nejsou proprietární řešení primárním zájmem.

Open Source řešení

Mezi Open Source GIS řešení je nejvíce prominentní QGIS. Podpora pro práci s 3D daty je v QGIS základní, ačkoliv v posledních letech zažívá značný vývoj v případě podpory mračen bodů. #todo – citace, Samotný QGIS přímo nepodporuje publikaci do webového prostředí jako ArcGIS. Této funkcionality lze však dosáhnout pomocí zásuvného modulu QGIStoThree.js, který jak jméno napovídá umožňuje vytvořit kompletní three.js scénu publikovatelnou jakožto webovou stránku přímo z QGIS GUI. Samotnou knihovnu three.js není možné považovat za GIS řešení, jelikož je to obecná knihovna, která umožňuje tvorbu 3D prostředí skrze JavaScript a nativně nepodporuje geoprostorovou lokalizaci. Zároveň je nutné zmínit, že takto publikované scény jsou na úrovni imerze Desktop VR, každopádně three.js podporuje WebXR API, tudíž teoreticky umožňuje dosažení imerzní VR úrovně.

### Geoprostorové knihovny

Při přesunu od desktopových řešení k čistě webovým, je možné zmínit CesiumJS - , vts-geospatial a ITowns. Porovnání těchto knihoven / frameworků provedl (Horký 2020; 2019 - Battle of 3D Rendering Stacks 2019), Jako další je možné zmínit

**MapBoxGL**

CesiumJS

CesiumJS je knihovna umožňující tvorbu interaktivních 3D aplikací založených na geoprostorových datech. Zaměřená je převážně na zobrazení velkých datových sad jako jsou modely terénu, budovy a družicové snímky, a to i v globálním měřítku, zpravidla ve formátech 3D Tiles. Výhoda CesiumJS je její integrace s Cesium Ion platformou, což je cloudové řešení úložiště a sdílení dat. Momentálně CesiumJS nepodporuje WebXR API, tudíž imerzní VR v rámci prohlížeče není možné, ačkoliv vývoj v tomto směru probíhá není však zatím oficiálně součástí CesiumJS knihovny. (CesiumGS 2023b; 2023a; Espinosa 2023). CesiumJS využívá pro 3D vizualizace např. švýcarská mapovací služba, kdy poskytují 3D model budov, vegetace a terénu pro celé Švýcarsko. CesiumJS by bylo vhodnou knihovnou jelikož se specializuje na geografická data a umožňuje propojení s 2D knihovnou OpenLayers. #todo – do overall zhodnocení zmínit že to je dobrej kandidát až bude mít WebXR support

**VTS-Geospatial**

VTS geospatial od Melown technologies je *tech stack*, který poskytuje způsob integrace různých zdrojů dat (3D modelů, výškových map, digitálních modelů povrchu, vektorových dat atd.) do jednotného výstupu, který je následně možné konzumovat skrze desktopové (vts-browser-cpp, Unity, ArcGIS) či webové klienty (vts-browser-js popř. obecné WebGL aplikace). Obdobně jako CesiumJS. Klient vts-browser-js nemá WebXR podporu, tudíž bez rozšíření podporuje pouze neimerzní VR vizualizaci.

**ITowns**

V případě 3D vizualizací je pak nutné zmínit knihovny jako Cesium (vhodné pro velké datové sady), three.js (knihovna pro vizualizaci obecných 3D dat – bez geoprostorové lokalizace, BabylonJS (Warner 2018). A propojení těchto technologií s technologiemi umožňující vizualizaci 3D dat popř. VR na webu. Threebox, deck.gl.

Tab. 4 Prozatimní tabulka technologií s parametry - mohou se změnit

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tech stack** | **WebGL** | **WebXR** | **Open Source** | **Dokumentace** | **Pracnost** | **Interoperabilita** |
| ArcGIS + ArcGIS JS API | Ano | Ne | Ne | Ano | Střední | Ano |
| City Engine + VR Export 360° | Ano | Ano | Ne | Ano | Střední | Ne |
| QGIS + qgis2threejs | Ano | Možná | Ano | Ano | Vysoká | Ano |
| Luciad Ria | Ano | Ne | Ne | Ano | Vysoká | Ne |
| CesiumJS | Ano | Ne | Ano | ANo | Vysoká | Ano |
| vts-geospatial | Ano | Ne | Ano | Ano | Vysoká | Ano |

### Herní enginy

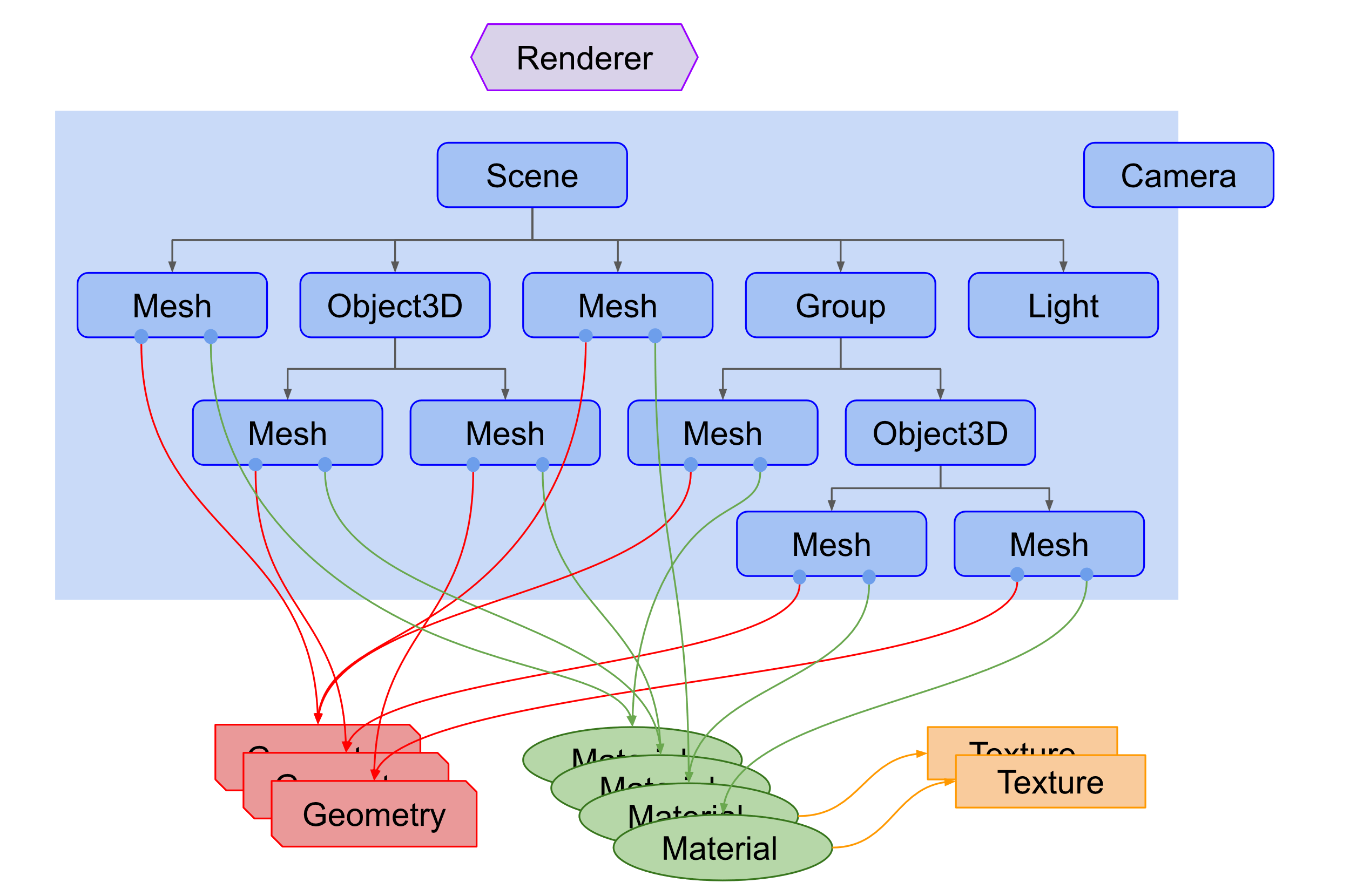
# todo – napsat podporu pro WebXR a popsat rychlej workflow jak dostat VR experience na web, nedělat moc dlouhý

Unity, Unreal Engine, Godot, Wonderland engine

Technologií umožňující tvorbu virtuálních prostředí pro web je mnoho z hlediska vývojáře je možné tyto technologie rozdělit na technologie orientované na UI (Unity, PlayCanvas, three.js) a na technologie orientované na kód (A-Frame, Godot aj.) (needle-tools 2023)

**Three.js**

Jedná se o nejpopulárnější *middle-level* knihovnu vystavěnou nad WebGL. Three.js aplikace se skládá ze základních komponentů viz. Obr. X.



**Needle engine (Unity, Three.js, WebXR)**

**Prototyp Petrov:**

Viz: <https://interesting-parallel-bit.glitch.me>

kod: <https://glitch.com/edit/#!/interesting-parallel-bit>

Jedná se o webový runtime pro 3D aplikace. Umožňuje lokální vývoj, nasazení na jakýkoliv server, networking a WebXR rozhraní. Needle Exporter umožňuje propojení mezi Unity Editorem a webovým runtime rozhraním, tím že podporuje export scén, animací, lightmap aj. skrze glTF standard. Needle engine je možné nazvat *workflow managerem* umožňující propojení mezi interaktivními technologiemi jako je Unity popř. Blender a webovým prostředím. Needle primárně podporuje otevřený glTF standard a vyžívá postupu, kdy je možné v binární formě (.glb) obsáhnout celou aplikaci nejen scénu. Primárním cílem Needle enginu je rychlá iterace při vývoji, responzivní design pro VR a AR, využití otevřených standardů pro 3D a web, interoperabilita mezi nativními aplikacemi a webovými frameworky. (needle-tools 2023)

Momentálně (30.1.2023) je Needle Engine podporován pouze pro Unity Editor. Zde je vhodné porovnání s nativním Unity WebGL výstupem. Unity WebGL umožňuje export kompletních projektů pomocí IL2CPP do C++ a následně do *WebAssembly,* což umožňuje spuštění výkonnostně náročných scén ve webovém prostředí. Toto je však umožněno na úkor rychlosti prototypování a iteracím ve vývoji samotné scény. Needle engine se snaží o rychlou iteraci při vývoji a možnost takřka instantního prototypování při tvorbě Unity projektů v jejich webovém ekvivalentu. Needle engine tedy poskytuje možnost, jak propojit Unity Editor s klasickým přístupem k webovému vývoji. (needle-tools 2023)

Needle engine je nadstavbou nad Unity Editorem a three.js. Výsledná webová aplikace je kompletně vykreslována pomocí three.js. Komponenty definované v rámci Unity Editoru jsou mapovány na vlastnosti a metody three.js třídy Object3D a graf scény. Vlastní komponenty mohou být definovány pomocí .ts nebo .js a Needle Enigne je následně automaticky přeloží do C# ekvivalentu, tudíž je možné s nimi automaticky pracovat v Unity. Needle Engine poskytuje funkcionalitu ve 3 hlavních formách (needle-tools 2023):

1. Souhrn předpřipravených komponentů a nástrojů, které umožňují tvorbu scény v rámci Unity Editoru
2. Export vytvořené scény do glTF formátu
3. Webové runtime prostředí, které načítá glTF soubory a vykresluje je pomocí three.js

**A – Frame (HTML, Three.js)**

**Prototyp Petrov:** <https://foam-jumpy-dianella.glitch.me>

A-Frame je webový framework umožňující tvorbu virtuálních prostředí. A-Frame je založen na HTML. Jedná se o *entity-component* *framework,* který poskytuje deklarativní a rozšiřitelnou strukturu nad knihovnou three.js. A-Frame využívá three.js pro manipulaci WebGL primitiv. *Entity – Component* přístup umožňuje definování entity jakožto elementů přímo v HTML kódu a následně definování komponent v rámci JavaScriptu. Při renderování scény A-Frame knihovna vytváří hierarchii DOM prvků z HTML elementů, které představují různé objekty ve scéně. Tyto prvky mohou být vybírány a manipulovány pomocí JavaScriptu, stejně jako jakékoliv jiné HTML prvky. Například lze pomocí JavaScriptu měnit pozici, rotaci nebo vzhled objektu ve scéně. A-Frame také poskytuje sadu vestavěných komponent, které lze přidávat k DOM prvkům, aby jim byly poskytnuty VR specifické vlastnosti, jako například schopnost reagovat na sledování hlavy, sledování ruky nebo dotykové události. Navíc mohou vývojáři vytvářet vlastní komponenty pro rozšíření funkčnosti. A-Frame využívá DOM jako základ pro vytváření a manipulaci s prvky VR na webové stránce.

**Mozila Hubs**

Prototyp UrbanGrid: <https://hubs.mozilla.com/bBJ9sxc?hub_invite_id=Lr9efka>

Prototyp 3D model Brno:<https://hubs.mozilla.com/jkemrr4>

Open source projekt vytvořen společností Mozzila. Umožňuje tvorbu kolaborativních virtuálních prostředí v rámci webového prohlížeče. Mozzila Hubs je vystavěna na základech WebRTC pro komunikaci a A-Frame, Three.js a WebGL pro tvorbu, vykreslení a interakci 3D scén. Součástí Mozzila Hubs je i *Spoke Editor*, což je GUI webová aplikace, umožňující interaktivní tvorbu virtuálních prostředí přímo v prohlížeči.

**Babylon.js**

https://doc.babylonjs.com/

**Model viewer**

<https://modelviewer.dev/>

**p5.js**

<https://p5xr.org>

**playcanvas**

<https://playcanvas.com/>D

**ReactXR**

**Sumerian**

**Verge3D**

**WonderlandEngine**

**DeckGL**

**KeplerGL**

**Spoke**

**Construct3**

## Praktické porovnání vybraných technologií

### Výběr technologie

# Návrh a implementace vlastní aplikace

Jak otestovat zda je VR dobrá pro vizualizaci dat na webu?

Generalizovat co jsou to geografická data a následně ukázat základní kategorie ve VR.

Ve VR dává smysl ukazovat 3D data to je jasný. Dává ale smysl ukazovat i 2D data – jaká to jsou?

**GEOG DATA (brainstroming možností):**

* Terén
  + 2d – vrstevnice, hypsometrie
    - Tech:
      * rastr - bitmapa (jpg)
        + zdroj: lokálně, služby – WMS, REST
      * vektor – features (GeoJSON, GML)
        + zdroj: lokálně, služby – WFS, REST
  + 3d – povrch
    - Tech:
      * Mesh: - tin (gltf, 3d tiles, i3s atd.)
        + Zdroj:

lokálně – gltf - nemůže být velké území – moc dat, popř. nějaký on demand loading – spatial subdivistion - HLOD?

služba – 3Dtiles? - loaduje se jen to co se vidí - cesium, vts-geospatial,

Google Maps 3DTiles API

Textured 3D mesh

Cesium 3D

* Objekty – budovy, silnice, vegetace, jednotlivé objekty
  + 2d – body, linie, polygony
    - Tech:
      * rastr - bitmapa (jpg)
        + zdroj:

lokálně – tif, jpg atd.

služby – WMS, REST

* + - * vektor – features (GeoJSON, GML)
        + zdroj:

lokálně – shapefile, GeoJSON aj.

služby – WFS, REST

* + 3d – instancované objekty
    - Tech:
      * Mesh: – 3d modely – tin – (gltf, cityjson, cityGML, obj, collada atd.)
        + Zdroj:

Lokálně – data naloadovaná do klienta při otevření aplikace

Služby - ?? – cdn? – sketchfab – vlastní server serving?

* + - * Mesh – jednoduchý – plocha s texturou co se otáčí – symbol (format???)
        + Zdroj:

??

* Text
  + …
* Tematická data – statistika, agreagace, atd
  + 2d – body, linie, polygony
    - Tech:
      * rastr - bitmapa (jpg)
        + zdroj:

lokálně – tif, jpg atd.

služby – WMS, REST

* + - * vektor – features (GeoJSON, GML)
        + zdroj:

lokálně – shapefile, GeoJSON aj.

služby – WFS, REST

* + 3d – volumetrické
    - Tech:
      * Mesh:
        + stejné
      * Voxely
        + ??

Odkud data?

* ČR – dmr, dmp,
  + Brno – všechno
* Švýcarsko – swiss topo
* Google API
  + https://developers.google.com/maps/documentation/tile/use-renderer

## Definice uživatelských požadavků

Za účelem úspěšné implementace je nutné definovat směr jakým by se aplikace měla ubírat. Je nutné zpočátku zmínit, že není v zájmu této práce vyvinout robustní univerzální VR aplikaci pro vizualizaci geografických dat, a to primárně z toho důvodu, že se jedná o komplexní problém, na němž pracují společnosti se značně většími znalostními, časovými a finančními zdroji. Je tedy důležité pečlivě vybrat některé aspekty tvorby takovéto aplikace a zaměřit se na ně.

Aplikace by měla primárně vizualizovat geografická data. Ačkoliv jak z definice VR vyplívá určitá míra interakce by měla být možná. Minimální požadavky na interakci by měli být pohyb uživatele, rozšířeným požadavkem pak interakce se samotnými daty. Aplikace by měla jasně sdělovat geografickou polohu dat v geoprostorovém kontextu.

Mezi definovanými požadavky je nutné vytvořit hierarchii dle priority požadavků. Jednou z metodik využívaných v softwarovém inženýrství je metoda MoSCoW. Jedná se o skupinu zkratek pro:

1. *Must have* – požadavky bez kterých se aplikace neobejde, minimální možný set požadavků
2. *Should have* – důležité požadavky, aplikace je funkční bez nich
3. *Could have* – požadavky při jejichž vypuštění nedojde k žádné změně aplikace
4. *Won´t have* – požadavky které nebudou součástí implementace

Pomocí této metody je možné konkretizovat obecně zvolené požadavky při výběru technologie na konkrétní aplikaci.

### Poučení z existujících řešení

**OSM a Aframe** - (VR Map 2019)

* World is flat
  + No curvature
  + No terrain
  + Ground tiles change size based on lon lat, in AFRAME coord sys je v metrech – tiles z vlastního cache serveru
* Budovy a stromy z Overpass API
* Kamera a Kontroler setup – vlastní modifikace (létaní atd)
* Code
  + Html - Start dialog popup, scene, camera, controlers
  + Map.js – load, handlers, fetch from Overpass API
  + Conversions – coordinate conversions
  + Position-limit.js – aframe component to keep position above ground
  + Tiles, trees.js, buildings.js – draw objects to the screen

Funkční požadavky:

Orientace

* Aplikace by měla podporovat orientaci polohy v rámci scény – orientace virtuální kamery, poloha v rámci celé scény (přehledová mapa)

Zobrazení geografických dat 3D i 2D

* 1. Terén, Plošné (budovy, objemy – tematická kart.), liniové (stuhová mapa), bodové (stromy)
  2. Podklad (textury terénu – ortofoto, 2D mapy), Textury objektů

1. Možnost interakce
   1. DOFs
   2. Interkace s objetky – atributové info, přepínání vrstev (nejde v mozila hubs), pohyb s objekty, analýzy

Nefunkční požadavky

1. Použitelnost – Aplikace by měla být pro uživatele intuitivní, v případě virtuální reality se jedná především o navigaci ve 3D prostředí, zároveň se jedná o intuitivnost doplňkového uživatelského rozhraní
2. Dostupnost – Aplikace by měla být dostupná 99% času.
3. Výkonost – Aplikace by měla být dostatečně výkonná tak aby zamezila nízkým hodnotám vykreslování, které mohou vést k značnému snížení imerze.

## Výběr HMD

HMD na pro které bude vizualizace primárně implementována a následně testována.

1. Low-Cost – Android 10 – Mi A2 Lite - Retrak Utopia 360° VR Headset - doma
2. Střední – Oculus Quest 2 – škola/doma
3. Hight end – HTC Vive - škola

### Prohlížeče

1. Oculus Browser
2. Chrome
3. Firefox
4. Samsung internet
5. Microsoft Edge
6. Wolvic (*Firefox reality*)

Optimalizace – Filtrace - (Coltekin, Reichenbacher 2011) – progresive loading – compresion

## Metodika

* Viz (Sherman, Craig 2019)

### Návrh

(Coltekin et al. 2020) dělí přístupy k návrhu XR na *visualisation design* a *interaction design.*

1. Před příprava dat – výběr, konverze do vhodného formátu, oprava chyb, optimalizace pro web (snížení podrobnosti, optimalizace textur, optimalizace velikosti).
2. Publikace dat na web – Kde to bude hostnutý ty data?
3. Tvorba webové stránky s vizualizací dat
4. Hostování webové stránky na webu

# UŽIVATELSKÉ TESTOVÁNÍ

# DISKUZE

# ZÁVĚR

PŘÍLOHY

BIBLIOGRAFIE

Seznam příloh

Příloha č

1. WebGL je založen na specifikaci OpenGL ES 2.0 s cílem maximalizovat přenositelnost na mobilní zařízení namísto OpenGL, který je pro desktopová řešení. [↑](#footnote-ref-1)
2. OpenXR je specifikace pro standardizaci rozhraní pro vývoj aplikací pro virtuální a rozšířenou realitu. Jejím cílem je umožnit interoperabilitu mezi různými platformami a technologiemi pro webovou XR. [↑](#footnote-ref-2)