Webová virtuální realita: nový způsob prezentace geoprostorových dat

Diplomová práce

Jan Horák

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

Geografický ústav

**BRNO 2024**



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

1. Zpracovat metodiku VR, 3D modelovani.
2. Popsat základní technologie umožňující VR na webu – SW – základní API WebGL, XR atd.
3. Seznam a popsat nástavby nad základními API
4. Vybrat tech
5. Udělat appku 😊

V první části práce byla zpracována teoretická

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. Vizualizaci velkého množství 3D budov (veškeré budovy v Holandsku) pomocí webového prohlížeče řeší .

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).

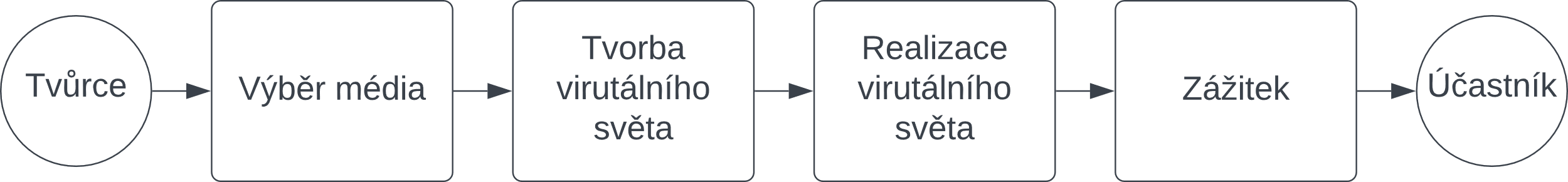
Dalším z pohledů na definování VR je dělení na základě míry imerze. Základním dělením virtuální reality podle míry imerze jsou kategorie (Riva 2006; Kvarda 2020; Burdea, Coiffet 2003):

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 virtuální svět v zobrazovacím zařízení (HMD). V rámci imerzního 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 a do jaké míry 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 DE dva základní aspekty. DE představuje rozsáhlý systém dat a informací, který agreguje a prezentuje data a informace týkající se Země a DE je 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 (VGE, DE, Metaverse) 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, Uživatel) 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 (Kvarda 2020).

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*) (viz. kap. X). 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, 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 s užitím geografických dat je jedním z cílů této práce 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, kontroléry). (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 Komponenty systému virtuální reality– upraveno dle: (LaValle 2020)

## Komponenty systému virtuální reality

Tato kapitola podrobněji popisuje zmíněné hardwarové komponenty virtuální reality, rozdělené na výstupní a vstupní zařízení.

### Výstup – Output

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-imerzní by neměly být považovány za zobrazovací zařízení pro virtuální realitu. Za semi-imrezní 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).

Výstupem není pouze vizuální, ale i haptický, popř. zvukový. Možnosti jednotlivých HMD se i těchto aspektech výrazně odlišují. V Tab. jsou shrnuty klíčové charakteristiky populárních HMD. Pro vývoj aplikace je primárním kritériem jaký způsob snímání popř. interakce (*tracking)* implementuje (viz. kap. Input). V Tabulce nejsou zahrnuty nededikované HMD jako Google Carboard aj., které pomocí čoček umožňují základní imerzi skrze mobilní telefon či jiné zobrazovací zařízení.

Tab. 1 Přehled rozlišení populárních HMD. sestaveno dle: (Takle 2022; Mehrfard et al. 2019; Brown 2023)



### Vstup – Input

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 maximálně pomocí 6 DoF, tedy translací a rotací kolem X, Y, Z os (Sherman, Craig 2019) viz. Obr.X. Obecně 3 DoF znamenají rotace na daném místě a 6 DoF znamená rotace na daném místě a pohyb v prostoru (translace). Tracking pozice v prostoru je následně možné dělit na *inside-out* a *outside-in* přístupy. Jedná se o rozdělení na základě toho, jak zařízení snímá svoji polohu v prostoru. *Inside-out* snímá okolní prostředí kamerami v rámci HMD, kdežto *outside-in* vyžaduje externí kamery, které snímají zařízení a tím určují jeho polohu.

Návazně na výše zmíněné kategorie zobrazovacích zařízení je možné vytvořit dělení dle VR hardwarem poskytnutých DoF, které odpovídá i historickému vývoji těchto zařízení:

1. **3DoF** – Gooogle Cardboard, Google Daydream, Samsung GearVR, Oculus Go atd. tedy „mobilní HMD“, kdy se jedná o obal s čočkami pro mobilní telefon. Produkty Daydream GearVR a Oculus Go poskytovali i ovladač, nejednalo se tedy pouze o stacionární HMD, ale byla zde možnost interakce. S nástupem HMD Oculus Quest se tyto produkty přestali vyrábět (RoadToVR 2023).
2. **6DoF** – Oculus Quest 2, HTC Vive, PlayStation VR aj. umožňují snímání stacionární polohy i polohy v rámci prostoru pomocí metod zmíněných výše. Součástí těchto produktů jsou i ovladače, které taktéž umožňují 6DoF. Tyto zařízení tedy umožňují rozšířenou interakci s virtuálním prostředím.

Diagram

Description automatically generated

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

Stupně volnosti, které umožňuje vstupní zařízení je důležitým parametrem při vývoji VR aplikace, kdy je nutné v návrhu počítat s možnými variantami. O to víc pokud aplikace cílí na webové prostředí, kde cílovým uživatelem může být kdokoliv. Je nutné tedy počítat s kritérii:

1. Kolik DoF aplikace bude podporovat, aneb jaké možnosti pohybu uživatel má.
2. Zda HMD je pouze display nebo jsou k němu 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 tvorbu virtuálních prostředí je nutné zmínit problematiku **lokomoce**, tedy pohybu ve virtuálním a reálném prostředí. Ve většině případů při tvorbě VR je virtuální svět, ve kterém má uživatel umožněn pohyb větší než fyzické prostředí, ve kterém se nachází. Z toho důvodů musí dojít při přenosu pohybů (translace a rotace) k nahrazení (*remapping*) pohybů z fyzického světa do světa virtuálního pomocí náhradních vstupů (kontrolérů) nežli jen snímání reálné polohy. La Valle poskytuje vysvětlení ve formě pohybového spektra, které vyjadřuje, do jaké míry jsou pohyb a poloha v reálném světe snímány a projektovány, popř. nahrazeny ve světě virtuálním viz. Obr. X. Při řešení nahrazení pohybu je nutné brát v potaz problematiku neshody reálného pohybu a jeho nahrazení pomocí vizuálního vjemu, který může vést k tzv. **vekci** (viz. Percepce pohybu).

A black screen with white text

Description automatically generated

Obr. 7 Pohybové spektrum a lokalizace typů vstupních a výstupních zařízení v jeho rámci. upraveno podle: (LaValle 2020)

Kategorizaci způsobů lokomoce rozvádí (Boletsis 2017), který uvádí kategorie:

* **Pohybové** – Pohyb v reálném světe je promítán do virtuálního, v případě většího VP jsou pak implementovány techniky chůze na místě, pohyb rukou aj.
* **Omezené** – Velikost virtuálního prostředí je definována překážkami v reálném prostředí, pohyb je tedy mapován 1:1.
* **Pomocí ovladačů** – Pohyb je realizován pomocí ovladačů, a to pomocí joysticků, tlačítek popř. pomocí náklonů hlavy.
* **Teleportací** – Realizuje pohyb ve VP nekontinuálně, uživatel je teleportován na vyznačené místo instantně, inicializace teleportace je často implementována skrze tlačítka ovladačů.

Interakce s virtuálním prostředím nespočívá však pouze v pohybu uživatele prostředím, ale i interakce s objekty. Interakce s virtuálními objekty často probíhá skrze procesy **selekce**, **manipulace** a **umístění** objektů, tedy způsoby pohybu (translace, rotace a transformace) virtuálních objektů. Druh vstupní informace lze následně rozdělit na (Menard 2019): **Metrické** – pohyby jsou snímány v prostoru (různé úrovně DoF – myš: 2, HMD kontrolér: 6, snímání rukou: 6 atd.), popř. joystick umístěný na kontroléru. **Binární** – stlačení tlačítka

Dělení dle míry interakce popisuje (Bořil 2022) ve své diplomové práci. Interakce může být nulová, kdy uživatel pouze sleduje virtuální prostředím. Další úrovní možností interakce ve VP je pomocí pohledu (*gaze based*), použitelný v případě HMD bez ovladačů, kdy ve směru pohledu uživatele je vysílán paprsek, pomocí kterého je možné interagovat s VP. Interakce je zpravidla realizována pomocí časového prodlení na daném objektu, popř. tlačítkem. V případě existence ovladačů, je zdroj paprsku vysílán z ovladače a interakce spouštěna pomocí tlačítek (*pointer based*). V případě neexistence ovladačů je vhodně v aplikaci umožnit interakci pomocí tradičních vstupních zařízení jako je myš a klávesnice (Menard 2019). Způsoby interakce ve VP jsou ovlivněny tím, že uživatel není schopen vidět reálné vstupní zařízení (např. polohu tlačítek na klávesnici). Řešením je převod např. klávesnice do virtuálního prostředí, vstup pomocí snímání pohybů rukou popř. ovládaní pomocí hlasu (Vicente et al. 2022).

A screenshot of a video game

Description automatically generated

Obr. 8 Vybrané příklady řešení interakce ve VP. zdroj: (Mozzila Corporation 2023; Ravasz 2019)

## 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. 9 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.

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. 10 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. 11 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. 12 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, 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 - zdroje

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **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 (např. licencovaným softwarem), 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. Formáty lze dále dělit na základě druhu dat pro který jsou primárně určeny. Zpravidla se jedná o mračna bodů (PCD, EPT), 3D modely (3DS, OBJ), 3D scény (Collada, glTF, KML), modely měst (CityGML, City JSON) (Mezzo 2019).

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. Formát je podporován v mnoha desktopových i webových řešeních (Khronos Group 2017). Formát GLTF je schopen obsáhnout kompletní 3D scénu se všemi komponenty (viz. kap. X).

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)

#todo – napsat příklady kdy to kdo kdy použil – viz. metavideo Metaconect 2020

**CityJSON,**

## 3D grafika

### Rendering pipeline

Za účelem úspěšné práce s 3D grafikou je nutné mít základní přehled o procesech, které umožňují vykreslování 3D prostředí na 2D obrazovku. Tento proces se v oblasti počítačové grafiky nazývá *graphics rendering pipeline.* Proces se skládá z několika etap, pořadí a specifikace etap se různí napříč implementacemi. Rozdělení etap v případě WebGL (viz . … ) je následující: (Ghayour, Cantor 2018; Ariën 2017; Sherif 2018):

1. **Nastavení scény:** Nastavení geometrie, normálových vektorů, barev, textur aj. parametrů 3D scény (viz. xx)
2. **Vertex shader:** Program, jehož hlavním úkolem je transformovat 3D souřadnice vrcholu z objektového prostoru do prostoru kamery (tedy relativizovat souřadnice vůči pohledové kameře) a aplikovat požadovanou projekci. Tyto transformace obvykle zahrnují operace jako posunutí, rotaci a změnu velikosti definované jedinou transformační maticí. Dále může *vertex shader* provádět výpočty osvětlení, mapování textur a další operace na úrovni vrcholu, aby připravily vrchol pro vykreslování.
3. **Určení viditelných částí (culling):** Ořezávání je proces, při kterém jsou odstraněny části 3D objektů, které nejsou viditelné v zorném poli kamery (*frustum*) popř. částí objektů, které jsou zakryté jinými objekty. Ořezávání pomáhá ušetřit výpočetní výkon tím, že se neprovádí vykreslování neviditelných částí.
4. **Rasterizace:** Proces kdy se body na povrchu 3D modelu převádějí na pixely na obrazovce s cílem vytvořit "fragmenty". Při rasterizaci se určuje, které body nebo vrcholy 3D objektu spadají do tohoto pixelového rastru na obrazovce. Atributy vertexů v rámci jednoho pixelu jsou interpolovány. Interpolace probíhá zpravidla na atributech polohy, normálových vektorů, barev aj.
5. **Fragment Shader:** Když je pixel vygenerován během rasterizace (převodu vrcholů na pixely), fragment shader bere do úvahy různé informace, jako jsou barvy textur, umístění světla a pozici kamery, a na základě těchto informací vypočítá konečnou barvu pixelu.
6. **Vykreslení (render):** Závěrečný krok v procesu zpracování grafiky, při kterém se barvy a vlastnosti aplikují na pixely na obrazovce. Zahrnuje některou logiku, jako je míchání (*blending*) a test hloubky (*depth testing*)

A diagram of a diagram

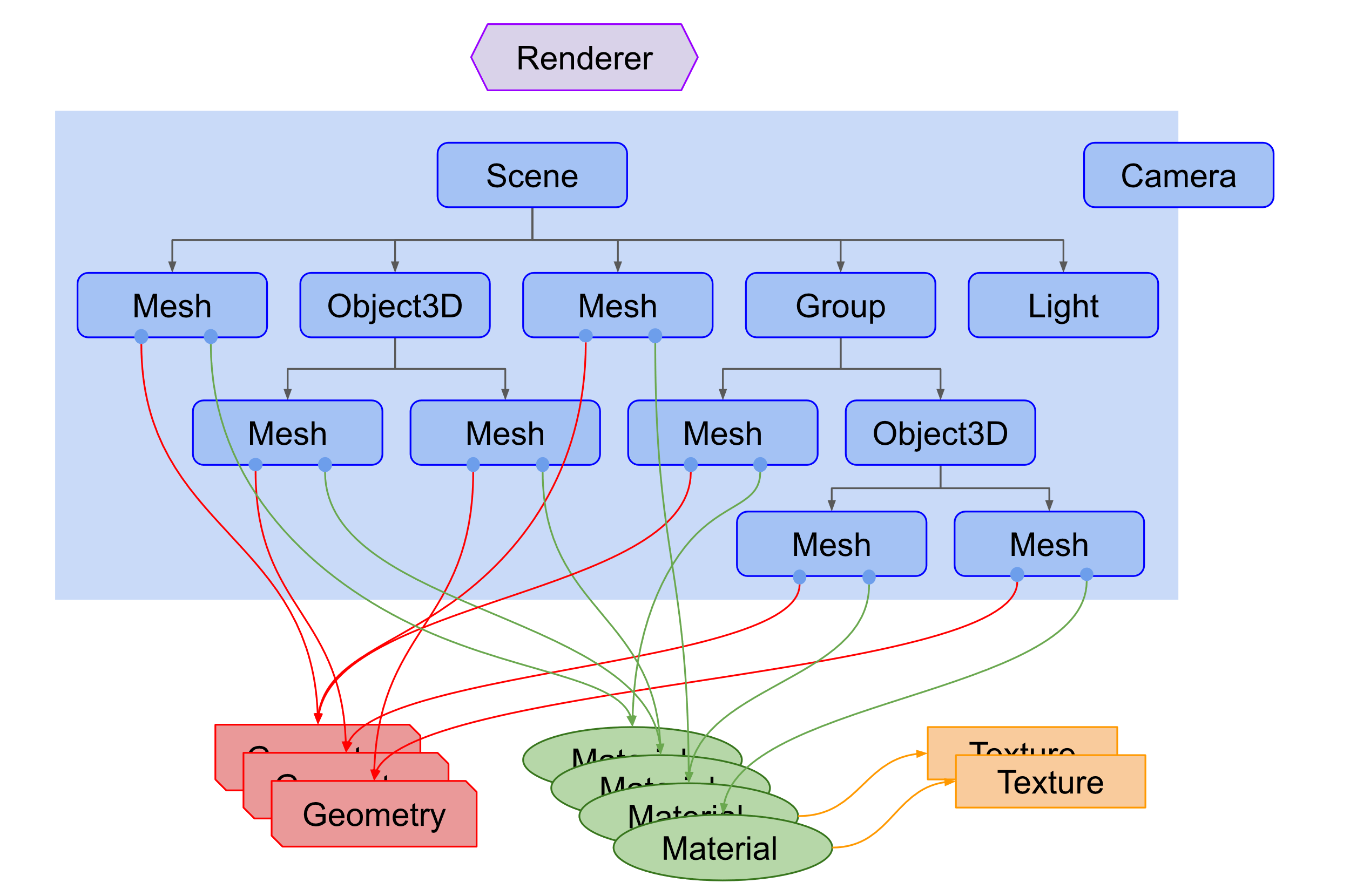
Description automatically generated

Obr. 13 *Graphics rendering pipeline*. vlastní tvorba dle (Ghayour, Cantor 2018; Ariën 2017; Sherif 2018).

### Komponenty 3D vizualizace

Systémy umožňující 3D vizualizaci popř. virutální realitu se ve většině případů skládají z obdobných komponentů. Q

**Scéna:** Scéna je jedním z klíčových prvků virtuální reality a 3D vizualizací a představuje digitální prostředí, ve kterém se odehrává uživatelský zážitek. Scéna funguje jako základní stavební blok, do kterého umisťujeme všechny objekty, které chceme zobrazit a s nimiž chceme interagovat. Struktura scény je implementována pomocí hierarchické stromové datové struktury obdobně jako je DOM v prohlížečích. Tato struktura se nazývá graf scény (*scene graph*). Tato struktura se využívá napříč 3D softwarem např. formát gltf, Blender nebo three.js. Scéna zpravidla obsahuje druhy objektů, které jsou Světla, Objekty, Meshe. **Mesh** tedy objekt, který se skládá z Geometrie (tvaru) a Materiálu (pravidel, jak má mesh vypadat). Geometrie je datová struktura, která reprezentuje polohová data jednotlivých vertexů. Zdrojem geometrie je zpravidla soubor v daném formátů (např. gltf´, obj. aj.). **Mesh** je tedy sémantická struktura pro tvorbu objektů z geometrie a jednoho či více materiálů.

A diagram of a car

Description automatically generated

Obr. 14 Příklad obecného grafu scény knihovny three.js. a formátu gltf. (three.js Contributors 2023b; Khronos Group 2023a)

**Kamera:** Kamera určuje pohled uživatele do virtuálního světa. Hlavní dělení typů kamer je dle typu zobrazení na **perspektivní** a **ortografické. Perspektivní** **kamera** vytváří scénu s iluzí hloubky. Objekty vzdálenější od kamery jsou zobrazovány menší než objekty blíže ke kameře, což vytváří dojem trojrozměrného prostoru. **Ortografická kamera** zobrazuje objekty ve scéně bez perspektivy. To znamená, že objekty mají stálou velikost, bez ohledu na jejich vzdálenost od kamery. Tento typ kamery se často používá pro technické výkresy, architektonické plány a 2D vizualizace, kde je důležitá přesná geometrie. V rámci virtuální kamery jsou pak klíčové parametry:

* **Zorný úhel:** Zorný úhel (*FOV -* *field of view*) určuje, jak široký úhel zobrazení kamera má.
* **Poměr stran** (*aspect ratio*): Poměr stran definuje proporci mezi šířkou a výškou obrazovky nebo zobrazovacího okna kamery. Správný poměr stran je důležitý pro zachování proporcí objektů ve scéně.
* **Výřezové roviny** (*clipping planes*): určují, které objekty jsou viditelné a které ne. Kamera může mít dvě výřezové roviny: blízkou (*near*) a vzdálenou (*far*). Objekty mimo tyto roviny nebudou zobrazeny (viz. *furstrum culling*).

A screenshot of a game

Description automatically generated

Obr. 15 Příklady perspektivní a ortografické kamery. (three.js Contributors 2023a)

**Materiály:** Materiály určují vzhled a povrchy objektů ve scéně. Jedná se o soubory vlastností a charakteristik, které definují, jak objekt interaguje se světlem a jak se jeví pozorovateli. Zahrnují textury, barvy, lesk a další optické vlastnosti, které dávají objektům jejich vizuální charakter.

* **Textury:** Textury jsou dvourozměrné obrazy, které se aplikují na povrch trojrozměrných objektů s cílem přidat detaily, barvu a vzory. KTX

**Osvětlení:** Osvětlení ovlivňuje, jak se objekty ve scéně zobrazují. To může zahrnovat sluneční světlo, umělé světlo, stínování a další efekty.

**Interakce:** Tato komponenta umožňuje uživatelům interagovat s virtuálním prostředím. To může zahrnovat pohyb, ovládání gesty, doteky a další metody komunikace.

**Fyzikální simulace:** Tato komponenta umožňuje simulovat fyzikální chování objektů ve scéně, což přidává realističnost a interaktivitu.

**Databáze a datové zdroje:** Pro ukládání a načítání dat ve virtuálním světě jsou používány komponenty pro práci s databázemi a datovými zdroji (datovými formáty).

Tyto komponenty společně tvoří základ pro vytváření komplexních a autentických 3D vizualizací a virtuální reality, které mohou být použity v různých odvětvích, včetně herního průmyslu, architektury, vzdělávání a dalších."

# Analýza technologií

Stěžejní kapitola práce se zaměřuje převážně na analýzu technologií, které mohou tvořit vhodný tzv. *Virtual World Generator* (viz. kap. Systém virtuální reality) pro účely vizualizace geografických dat na webu.

#todo – řídit dle postupu tvorby – SLAM, -- CAD, GIS / 3d modelování – 3d enginy (game enginy) / web enginy --- XR integrace

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.

Obecný postup tvorby virtuálního prostředí je možné zjednodušit dle úkolů na:

1. Získání dat pro zobrazení – SLAM
   1. Lidar, fotogrammetrie, tradiční mapování (textury)
2. Zpracování dat
   1. Vytvoření 3D objektů (mesh), zpracování textur, vytvoření 3D scény
3. Vizualizace dat
   1. Zobrazení dat pomocí vybraného vykreslovacího enginu, aplikační logika – implementace uživatelské implementace s daty
4. Publikace dat
   1. Zvěřejnění vizualizace v rámci internetu, testování, optimalizace

## Taxonomie technologií

Z hlediska funkce kategorizují (Stachon, Kubicek, Herman 2020) do třech hlavních skupin na CAD (computer aided design), GIS, programy pro tvorbu 3D grafiky a fotogrammetrické programy. Dále zmiňují i herní enginy a webové technologie. Autoři dále zmiňují dělení 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 GIS a CAD řešení (QGIS, ArcGIS, GRASS, FME, Autodesk, Bentley Microstation aj.), aplikace pro tvorbu 3D grafiky (Blender, SketchUP, Microstation, Rhinoceros 3D aj.) 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. Webové technologie dříve závislé na externích rozšířeních do vybraných internetových prohlížečů, jsou nyní nahrazeny standardizovanými technologiemi jako je HTML5, WebGL, WebXR popř. rozsáhlý ekosystém knihoven a frameworků v jazyce JavaScript usnadňující tvorbu virtuálních prostředí (Stachon, Kubicek, Herman 2020).

# todo – dat pryč – zbytečné okecávačky

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. V případě webového prosředí je pak možné mluvit primárně o *rendering* engine řešeních, které umožňují 3D vizualizace na webu prostřednictvím javascriptu.

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 a zpracování geoprostorových dat.

A close-up of a website

Description automatically generated

Obr. 16 Taxonomie technologií umožňujících vykreslení 3D grafiky na webu. Upraveno dle: (Khronos Group 2018)

Diagram

Description automatically generated

Obr. 17 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. 18 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. 19 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 2023b). 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 (s odpovídající snímkovou frekvencí) obsahu v rámci HW (Immersive Web Working Group 2023; tro to WebXR and A-Frame Part 1 2021). WebXR podpora v rámci prohlížečů a jednotlivých VR zobrazovacích zařízeních je klíčová v případě hodnocení přístupnosti.WebXR operuje na základě relací (*session*). Knihovna umožňuje tři typy relací a to (MDN Contributors 2023):

* ***immersive-vr*:** Umožňuje přístup k imerzním u zobrazovacímu zařízení a umožňuje zobrazení virtuálního obsahu v plném VR režimu.
* ***immersive-ar:*** Umožňuje přístup k imerznímu zařízení, s tím že vykreslený obsah je kombinován s reálným světem. Způsob prolnutí reálného světa (vstupu z kamery) se řídí pomocí *environmentBlendMode* parametru.
* ***inline:*** Umožňuje zobrazit virtuální obsah (3d render) v rámci standardního HTML dokumentu, aniž by vyplnil celou obrazovku. Umožňuje více relací na jedné stránce a nevyžaduje speciální hardware. V případě systémů s IMU umožňuje rotační snímání.

Aplikace založená na WebXR API musí následovat tzv. životní cyklus VR webové aplikace, který spočívá v (Immersive Web Working Group 2022; MDN Contributors 2023):

1. Dotaz na to, zdali je XR podporováno (prohlížečem / zařízením) a jaký typ relace je podporován, popř. vyžadován.
2. Pokud je podpora k dispozici, informovat uživatele o dostupnosti vyžadované XR funkcionality např. v podobě přidání tlačítka umožňujícího spuštění virtuálního prostředí.
3. Uživatelská událost (*event*) signalizující, že uživatel má zájem o spuštění XR relace.
4. Požadavek na relaci, kde je možné specifikovat typ (*inline, immerive-vr, immersive-ar*) a vlastnosti (např. možnosti pohybu uživatele poskytnuté daným zařízením viz. kap. Input *unbounded, local* aj.), které by požadovaná relace měla splňovat.
5. Vytvoření vykreslovacího cyklu, který obnovuje senzorická data (poloha, pohyb atd.) a který generuje snímky na obrazovku zařízení.
6. Vykreslování, dokud uživatel nespustí událost ukončení XR relace.
7. Ukončení XR relace.

Samotné WebXR API zprostředkovává pouze jednotný interface pro přístup k funkcionalitě vstupních a výstupních zařízení. Za účelem vytvoření virtuálního zážitku je tedy nutné propojení s animačním cyklem definovaným v rámci některé z technologií umožňující renderování 3D grafiky na webu (WebGL + JS knihovny) viz. kap.X skrze XRWebGLLayer.

A diagram of a process

Description automatically generated

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 | - | - |

### Vývojářské nástroje

#todo – představit emulátory HMD vstupů – WebXR rošíření pro Firefox, Oculus emulator pro Chrome. Propojení s HMD skrze USB.

## 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.

## Analýza technologií

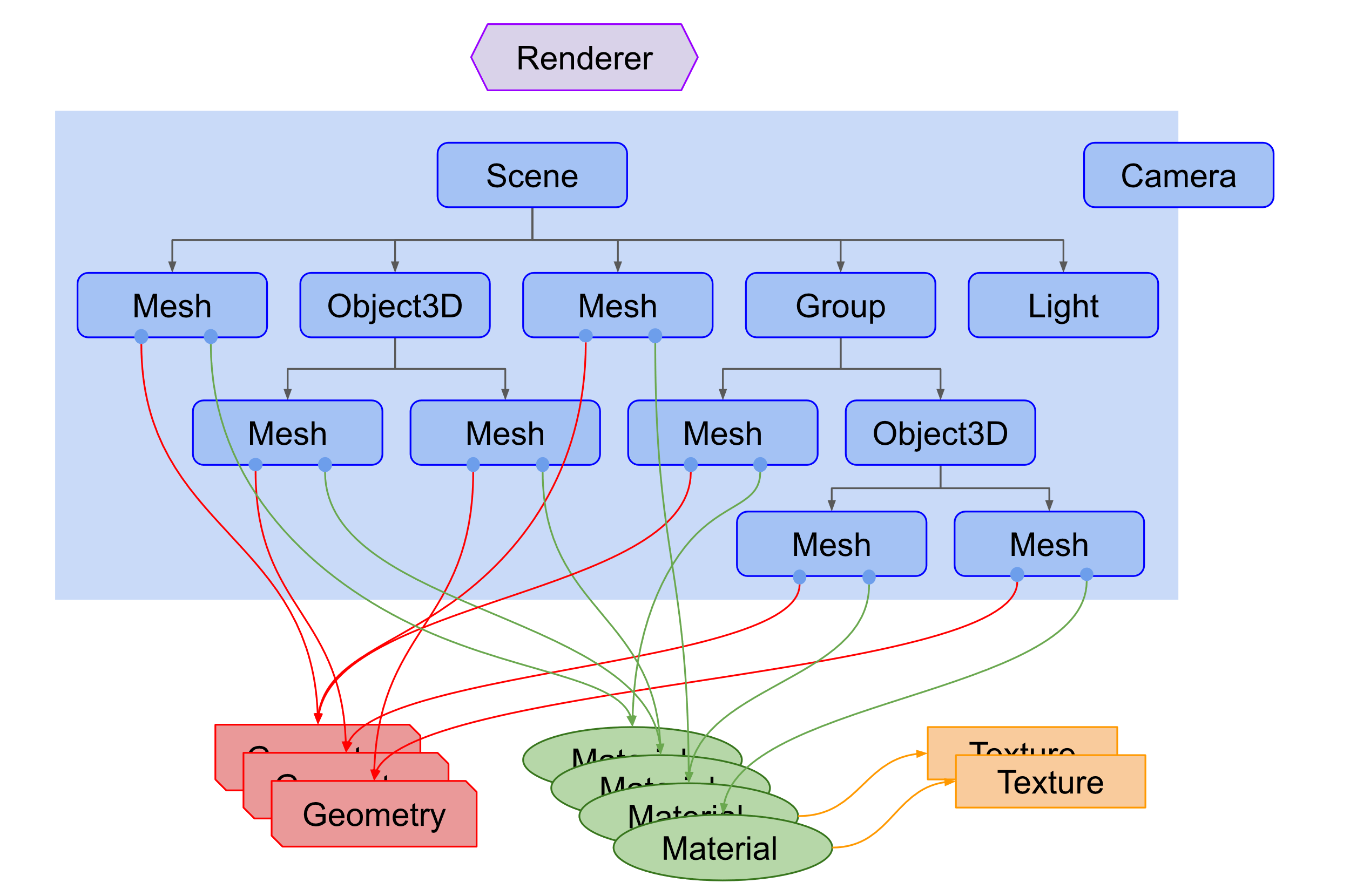
Technologie umožňující 3D vizualizaci na webu je možné obecně popsat jako abstrakce nad WebGL API. Následující kapitola je výsledkem analýzy a praktického porovnání technologií na základě vytvoření jednoduché scény. Primárním hodnotícím kritériem technologií je jejich kompatibilita popř. podpora (existující nástroje) pro WebXR API, jehož implementace je klíčová pro existenci virtuální reality na webu.

### Rendering enginy

Vysokoúrovňové knihovny jako Three.js, Babylon.js, PlayCanvas, SceneGL, PhiloGL a další umožňují vytvářet složité 3D animace, které jsou připraveny k zobrazení v prohlížeči, bez velkého úsilí, které by bylo vyžadováno při vytváření samostatné (nativní WebGL) nebo tradiční aplikace s použitím pluginů.

**Three.js**

Jedná se o Javascript knihovnu, tvořící abstrakci pro práci s WebGL. Knihovna byla vytvořena Ricardem Cabellem (Mr. Doob) a je publikována pod MIT Licencí. Jedná se o velice populární knihovnu (více nežli 1.1 mil. instalací skrze npm), která je v aktivním vývoji. (npm 2023) Knihovna poskytuje velice detailní a udržovanou dokumentaci, z tohoto důvodu je three.js de-facto standard pro renderování 3D grafiky na webu. Three.js vytváří vlastní ekosystém frameworků a implementací, které rošiřují její funkcionalitu např. r3f – tvorba 3D UI, aframe – systém pro tvorbu VP a následně i konkrétní implementace v případě geoprostorových informací např. ITowns popř. 3dbag-viewer aj.



Hlavním komponentem Three.js je Renderer, který při poskytnutí Scény a Kamery umožní skrze WebGL vykreslit část 3D prostředí, které je v záběru kamery jakožto 2D obraz v rámci <canvas> HTML elementu. Hlavní strukturou Three.js je graf scény, který obsahuje objekty (viz. Obr.X). Stromová struktura určuje polohu a orientaci objektů, poloha objektu se určuje relativně k jeho rodičovskému objektu. **Kamera** může být mimo scénu, jelikož může mít danou, popř. iteraktivní polohu, zároveň pokud má kamera rodičovský objekt a ten mění svou polohu v prostoru, kamera jej bude následovat.

Three, PlayCanvas, Babylon.js,

### Geoprostorová řešení

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 prominentního 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, 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. Jedná se o velice hodnotný nástroj pro konvertování GIS dat do webového prostředí. 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 viz. (kap. three.js) .

Při přesunu od desktopových řešení k čistě webovým, je možné zmínit **CesiumJS, MapboxGL, deck.gl, vts-geospatial, ITowns**. Porovnání těchto knihoven / frameworků provedli (Horký 2020; 2019 - Battle of 3D Rendering Stacks 2019; Peters et al. 2021).

**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.

**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.

Další porovnání za účelem vývoje nové aplikace zobrazení 3D modelů budov v Holandsku provedli (Peters et al. 2021). Porovnávali technologie s požadavky na síťový výkon a nízké výpočetní nároky na klienta. Jako nevhodné vyhodnotili CesiumJS (příliš výpočetně náročné) a MapboxGL (nízká specializace na 3D a nejasné OpenSource definice). V rámci výzkumu vznikla aplikace **3dbag-viewer** založená na three.js zobrazující data skrze 3D TIles (budovy) a WMTS (podkladová mapa). Prohlížecí aplikace sama o sobě nepodporuje imerzní VR, ale jelikož je založena na knihovně three.js je zde potenciál pro rozšíření.

**ITowns** je framework založen na three.js, umožňuje vizualizaci geografických dat ve 3D prostředí podporuje geoprostorových služeb WMS, WMTS aj. a dat 3D Tiles, GeoJSON aj. iTowns nepodporuje integraci s WebXR. Na úrovni desktop VR umožňuje virtuální průchod obdobný, jaký poskytuje streetView na Google Maps. Sám o sobě framework nepodporuje rozšíření do imerzní VR úrovně, ale obdobně jako 3dbag-viewer je založen na three.js tudíž rozšíření o WebXR funkcionalitu je teoreticky možné.

**Deck.gl** je knihovna umožňující 3D vizualizaci geoprostorových dat. Jejím hlavním záměrem je vizualizace velkých datových sad v podobně vrstev, obdobně jako v tradičních GIS. Knihovna je zaměřena především na tematickou vizualizaci. Knihovna je kompatibliní s tradičními geoprostovými formáty jak GeoJSON aj. Míra imerze je na úrovni Desktop VR, kdy knihovna umožňuje zobrazení na tradičních obrazovkách a interaktivitu v 3D prostředí pomocí myše a klávesnice tedy přiblížení a posun. Knihovna momentálně nepodporuje WebXR API tudíž rozšíření míry imerze je momentálně nemožné a knihovna není vhodným kandidátem. (deck.gl 2023)

A map of a city

Description automatically generated

Obr. 20 3dbag-viewer. zdroj: (Peters et al. 2021)

A street with cars and buildings

Description automatically generated

Obr. 21 iTowns příklad zdroj: (iTowns Contributors 2023)

Na základě výše uvedených řešení je možné určit, že pro geoprostorové informace dominuje především 3D Tiles formát a následně 3D renderery cesium.js a three.js. V případě technologií zabývajících se zobrazením 3D scén na webu je možné tvrdit, že mají buďto minimální popř. žádnou podporu pro tvorbu virtuálních zážitků. Z této analýzy je možné vyvodit, že většina technologií je přímou implementací nad WebGL popř. využívá populární three.js knihovnu.

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

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **S** | **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

### Webová řešení

**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.

Podpora pro 3D Tiles není dokonalá, pouze základní podpora pro three.js.

**Mozila Hubs + Spoke editor (Three, Aframe, WebRTC aj.)**

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.

**React Three Fiber (Three.js + ReactJS)**

**WonderlandEngine (Aframe)**

**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

### Webová řešení produkty

https://learn.framevr.io/

## Praktické porovnání vybraných technologií

Metodika testování

Testování VR aplikace na webu by mělo projít 3 mi fázemi:

1. Zdali je aplikace funkční při prohlížení na klasické obrazovce s klávesnicí a myší
2. Na emulátoru VR headsetu
3. Na mobilním telefonu
4. V HMD – Oculus Quest

### 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

## UX

Menu -

# UŽIVATELSKÉ TESTOVÁNÍ

# DISKUZE

Optimalizace Paměti a Výkonu

A diagram of a workflow

Description automatically generated

Tech Stacky se mění ale koncepty a technologické přistupy jsou obdobné. Výběr technologie tedy není hlavním cílem, jako popis a analýza způsobu vizualizace dat.

Acesibility

A diagram of a computer program

Description automatically generated

# 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)