Webová virtuální realita: nový způsob prezentace geoprostorových dat

Diplomová práce

Jan Horák

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

Geografický ústav

**BRNO 202?(3)**



Bibliografický záznam

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

Bibliografický entry

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá..

Abstract

Bachelor thesis..

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

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**Student: Bc. Jan Horák**

**Studijní program: Geografická kartografie a geoinformatika**

**Studijní obor: Geografická kartografie a geoinformatika**

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

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

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

**Zásady pro vypracování:**

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

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

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

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

3. Návrh a implementace vlastní aplikace na principech virtuální reality

4. Uživatelské ověření vytvořené aplikace

5. Diskuse zjištěných výsledků a závěr

Rozsah grafických prací: ?

Rozsah průvodní zprávy: ?

Seznam odborné literatury:

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

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

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

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

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

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

*Jazyk závěrečné práce:* čeština

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

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

RNDr. Vladimír Herber, CSc.

pedagogický zástupce ředitele ústavu

Poděkování

Lukáš Herman, … atd.

Prohlášení (dodelat odsazení podle délky poděkování)

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

Brno … 2023 Jan Horák

|  |
| --- |
| Jméno Příjmení |

OBSAH

--- obsah až bude ---

# Úvod

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

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

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

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

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

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

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

## Cíle práce

Hlavní cíle práce:

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

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

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

### Výzkumné otázky

#TODO – jak správně formulovat

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

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

# Metodika

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

# Rešerše – Současný stav řešené problematiky

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#TODO Usability and user testing

# Teoretické základy

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

## Virtuální realita

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

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

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

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

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

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

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

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

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

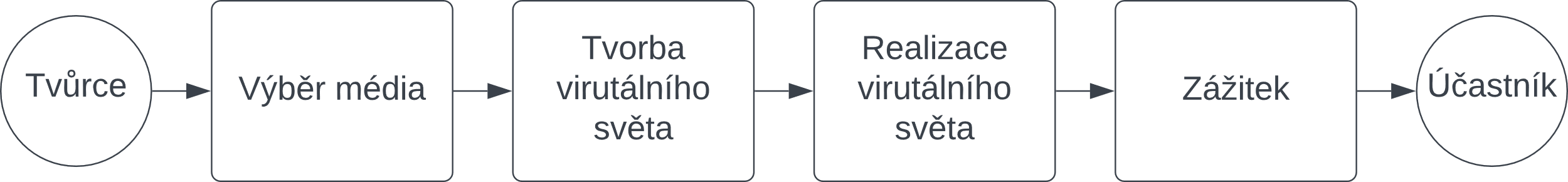
Důležité je objasnit mimo definice i zužívanou terminologii. LaValle pod termín virtuální reality řadí termíny AR (*Augmented reality*), MR (*Mixed reality*) a XR (*Extended reality*). Tyto termíny jsou obecně vnímány jako distinktivní body na *virtuálním kontinuu* (Milgram, Kishino 1994). MR a XR jsou pak považovány za generalizace VR, AR a jiných termínů nacházejících se na virtuálním kontinuu. XR je považován za novější termín, který zaštiťuje ostatní více z pohledu technologického než koncepčního. Na konkrétní definice se názory napříč literaturou různí (Çöltekin et al. 2020b). Do termínu virtuální reality LaValle zahrnuje i termín *virtual environments,* který je preferován v akademickém prostředí, v geografii tedy pak VGE. Při tvorbě virtuální reality však klade více důraz na termín *perception engeneering*, tedy na korektní tvorbu samotného zážitku, více nežli na tvorbu virtuálního prostředí. Dalším z pohledů na definování VR je dělení na základě míry imerze. Základním dělením virtuální reality podle míry imerze jsou kategorie (Riva 2006; Kvarda 2020; Burdea, Coiffet 2003):

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

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

## Komunikační medium

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



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

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

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

### Digital Earth, VGE, Metaverse,

Metaverse

## Systém virtuální reality

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

A screenshot of a computer screen

Description automatically generated

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

A diagram of a diagram

Description automatically generated

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

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

### Hardware

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

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

### Software

LaValle zmiňuje, že v ideálním případě by bylo vhodné, aby existoval nějaký specializovaný *VR engine*, díky němuž by vývoj VR systémů nemusel obsahovat nízko-úrovňové problémy (integrace HMD, aj.). Právě odhalení vhodné kombinace softwarových technologií pro tvorbu VR systému ve webovém prostředí je jedním z cílů této práce. Více k tomuto tématu viz. (kap. Analýza technologií)

Diagram

Description automatically generated

Obr. 4 Interakční diagram systému virtuální reality – zdroj: (LaValle 2020) #TODO – dát pryč/upravit do češtiny

## Zobrazovací zařízení

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

Diagram

Description automatically generated

Obr. 5 Dělení HMD, zdroj: (Coltekin et al. 2020)

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 zařízením (HMD).

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

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

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

### Tracking

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

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

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

Diagram

Description automatically generated

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

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

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

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

## Percepce

Za 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).

Diagram, shape

Description automatically generated

Obr. 7 Monokulární prostorová vodítka (upraveno dle: (Bogdanova, Boulanger, Zheng 2016)) #TODO upravit do češtiny

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 (frame 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)

## #TODO - Principy 3D modelování v kontextu VR a kartografie

3D kartografická vizualizace na webu není příliš rozšířená (Cibula 2021), 3D kartografická vizualizace v rámci virtuální reality pak ještě méně.

### 3D grafické proměnné

… ‚  
#todo je potřeba?

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

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

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

A picture containing origami

Description automatically generated with medium confidence

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

A picture containing sky, building, outdoor, stadium

Description automatically generated

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

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.

#TODO - Datové modely – GIS => 3D web

### 3D formáty pro web

# TODO – tabulka dle Cibula + vlastni doplneni – context VR – binarky, text - GML, JSON deleni a konkretni pak

**glTF (GL transmission format)**

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.

Diagram

Description automatically generated

## Komponenty Virtual World Generator

### Scéna

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

### Zobrazení

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

### Pohyb

* DoFs
* Transformace
* Kamery
* Controlery

### Osvětlení

* Spot, Directional, Ambient

### VR a kartografie

# Analýza technologií

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

## 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.)

#todo – domyslet podle hermana

### 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).

#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.

## Úrovně abstrakce – taxonomie technologií

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

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

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

Dalším z kategorizačních kritérií pro popis technologií je úrovně podrobnosti, 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*).

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

A close-up of a website

Description automatically generated

Obr. 10 Taxonomie technologií umožňujících vykreslení 3D grafiky na webu. Upraveno dle: (Khronos Group 2018)

Diagram

Description automatically generated

Obr. 11 Taxonomie webových technologií umožňujících tvorbu virtuálních prostředí. zdroj: (Godber 2022) – #todo dodělat o vlastní?

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

## GIS

**ESRI**

* ArcGIS JS API – jen 3D
* Esri City Engine – VR export na web

**FOSS**

* QGIS2Three.js

### WebGIS

Z pohledu geoprostorové vědy je nutné zmínit i široký ekosystém webových GIS řešení.

Z hlediska geoinformatiky a kartografie je na webu primárním záměrem vizualizace dat. Toho je možné dosáhnout pomocí použití vybraných knihoven. Výběr knihovny se odvíjí od stanovených požadavků. Požadavky jsou pak diktovány především parametry dat (dimenzionalita, velikost atd.) popř. požadavky na samotnou vizualizaci (míra interaktivity, imerze aj.).

Interaktivní vizualizace 2D dat umožňují knihovny Leaflet, OpenLayers, MapboxGL. Dále je pak možné pro 2D vizualizaci využít Google, Here, Bing aj. mapové API, kde na rozdíl od výše zmíněných knihoven je mnohem méně prostoru pro vlastní tvorbu.

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

## Desktop

Unity, Unreal Engine ,Blender, CAD, Google Earth Vr, VR Chat aj.

## Webový vývoj

Benefity volby webových technologií pro 3D geografickou vizualizaci. 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 (Microsoft Office Suite 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, WebGL, WebXR), které umožňují snazší vývoj pro webové prostředí.

### Web APIs

DOM API

Při zpracování HTML dokumentu prohlížečem se vytvoří abstraktní stromová datová struktura, která se používá k vykreslení stránky. Tato struktura je poté přístupná prostřednictvím rozhraní, nazvaného DOM (*Document Object Model*) (Řeháček 2020). Reprezentuje daný HTML dokument tak aby se dalo manipulovat s jeho strukturou, stylem a obsahem, pomocí skriptovacího jazyka např. JavaScript (MDN Contributors 2022a). Z hlediska HTML se tedy jedná o objektový model definující atributy, metody a události. Z hlediska JavaScriptu se jedná o API umožňující manipulaci s HTML dokumentem.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Obr. 12 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. Díky WebGL je implementováno přímo v prohlížečích, tudíž není potřeba žádných pluginů (Khronos Group 2023). WebGL pro vykreslování využívá jazyk GLSL, který popisuje způsob, jakým je daný objekt vykreslen (*shader*). WebGL je základem, který dále rozšiřují JavaScript knihovny (viz. kap. X), které nahrazují složitý zápis grafického vykreslování jednoduššími API. WebGL umožnilo přístup k GPU skrze JS v roce 2011, v roce WebGL2 bylo vyvinuto. Doposud se jedná o standardní API zobrazení složitější grafiky na webu.

WebXR API

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

#TODO – popsat jednoduše

Životní cyklus VR aplikace spočívá v:

1. Query – test zda XR stav je podporován
2. XR enable – poskytnutí XR prostředí uživateli
3. Enter XR event – akce uživatele
4. Request na HW
5. Render loop
6. Exit XR

WebGPU

WebGPU je dalším krokem v evoluci webových grafických API. 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).

Tab. 2 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)

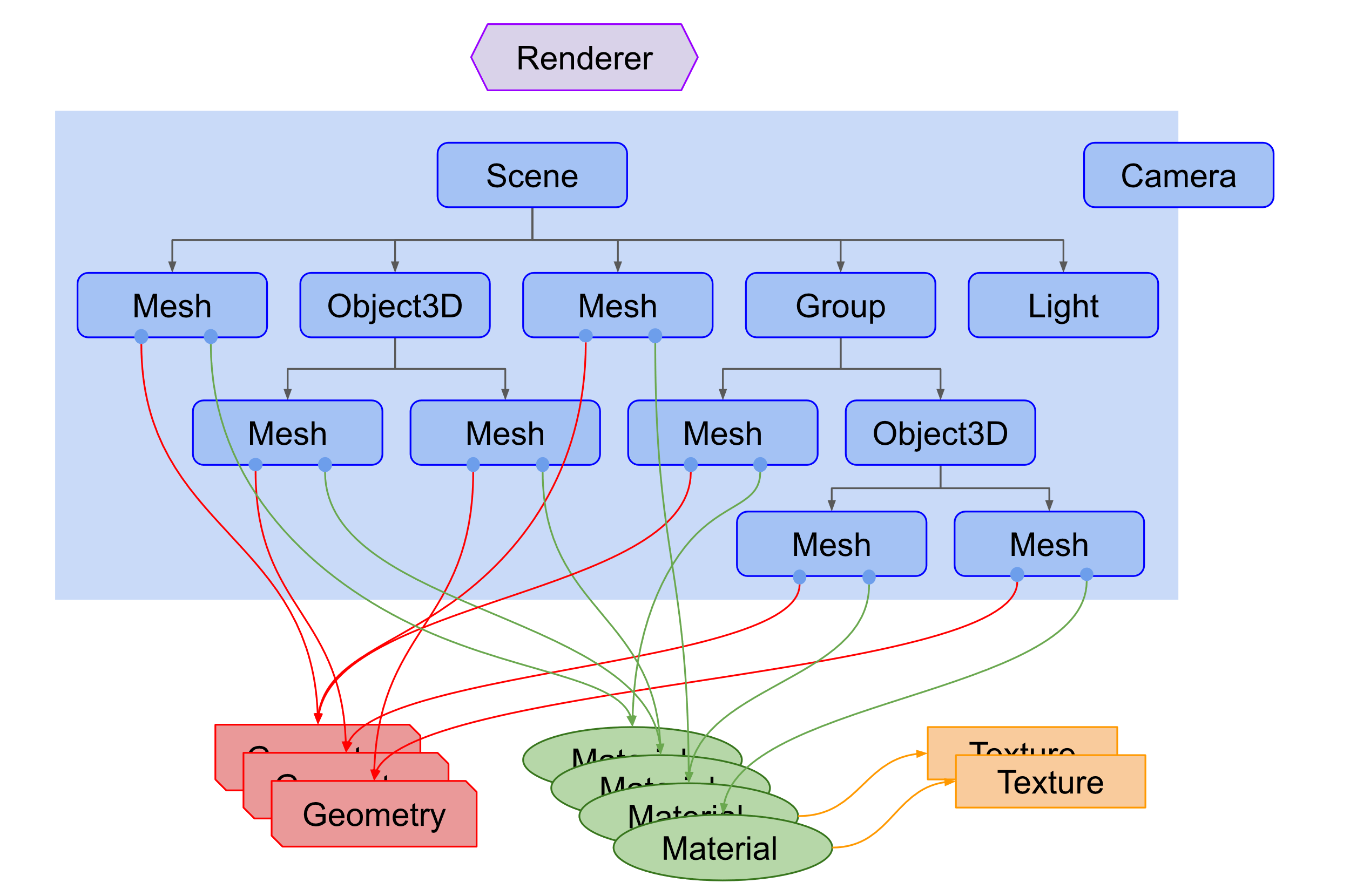
|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Prohlížeče** | | **Částečně1** | **Nutné povolit2** | **Zastoupení [%]3** |
| Desktop | Chrome | 79.0 - 112.0 | - | 22.71 |
| Edge | 79.0 - 109.0 | - | 4.17 |
| Safari | - | 13.0 - 16.2 | 3.12 |
| Firefox | - | 77.0 - 111.0 | 3.05 |
| Opera | 66.0 - 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 | - | - |

### Frameworky, knihovny a enginy

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

**Three.js**

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



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

**Prototyp Petrov:** <https://pepper-puzzled-quince.glitch.me/>

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

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

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

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

**A – Frame (HTML, Three.js)**

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

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

**Mozila Hubs**

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

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

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

**Babylon.js**

https://doc.babylonjs.com/

**Model viewer**

<https://modelviewer.dev/>

**p5.js**

<https://p5xr.org>

**playcanvas**

<https://playcanvas.com/>D

**ReactXR**

**Sumerian**

**Verge3D**

**WonderlandEngine**

**MetaVRse**

**Glitch**

**Vectary**

**DeckGL**

**KeplerGL**

**Spoke**

**Construct3**

## Praktické porovnání vybraných technologií

#todo rozdělit požadavky na aplikaci a na výběr technologie – aplikace je subset požadavků technologie ??? nějak to pak propojit, JE V TOM BORDEL!!

# Návrh a implementace vlastní aplikace

## 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.

Funkční požadavky:

Orientace

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

Zobrazení geografických dat 3D i 2D

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

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

Nefunkční požadavky

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

## Výběr HMD

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

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

### Prohlížeče

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

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

## Metodika

* Viz (Sherman, Craig 2019)

### Návrh

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

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

# UŽIVATELSKÉ TESTOVÁNÍ

# DISKUZE

# ZÁVĚR

PŘÍLOHY

BIBLIOGRAFIE

Seznam příloh

Příloha č

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