

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky



Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D: koncept, metody, implementace

Geovisualization environment for visual analysis in 3D:
concept, methods, implementation

Doktorská disertační práce

Mgr. Jakub ŽEJDLÍK

Vedoucí práce: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Olomouc 2026

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Disertační práce se zabývá 3D geovizualizací tematických dat, jejími metodami a vizuální analýzou ve 3D prostředí. V rámci bibliometrické analýzy byly identifikovány aktuální trendy a mezery v oblasti 3D kartografie, což přispělo k výběru vhodných literárních zdrojů a pomohlo lépe specifikovat název a zaměření práce. Následná rešerše současného stavu problematiky byla zaměřena zejména na vizuální analýzu, 3D geovizualizaci a 3D data. Na základě bibliografické analýzy a rešerše bylo vymezeno sedm metod 3D geovizualizace tematických dat – horizontální roviny, mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny, 3D kartodiagram, 3D kartogram a voxely. Všechny metody byly zhodnoceny v kontextu grafických proměnných (např. barva, tvar, extruze, průhlednost). Zároveň byly ohodnoceny různé programy z hlediska vhodnosti pro tvorbu 3D geovizualizační aplikace, přičemž byl jako nejvhodnější zvolen ArcGIS Pro, případně ArcGIS Online.

Jádrem práce je návrh a následná technická implementace 3D geovizualizačního prostředí. V první případové studii byla vytvořena aplikace pomocí ArcGIS Online. Toto řešení však neposkytovalo dostatečné možnosti individuálních úprav. Z toho důvodu bylo pro druhou případovou studii využito technologie ArcGIS Maps SDK for JavaScript. Vytvořená aplikace sloužila jako prototyp pro finální 3D geovizualizační prostředí. Výsledná webová aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 představuje komplexní prostředí umožňující uživatelům přidání vlastních dat, volbu metody vizualizace, přímou manipulaci s grafickými proměnnými, úpravu znakového klíče v reálném čase a správu vrstev. Dílčí výsledky byly průběžně hodnoceny uživatelským testováním, aby byla ověřena použitelnost aplikace a jednotlivých vizualizačních metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

prostorový; vizualizace; vizuální analýza; 3D

Počet stran práce: 131

Počet příloh: 4

ANNOTATION

The dissertation thesis deals with 3D geovisualization of thematic data, its methods, and visual analysis in a 3D environment. Within the framework of bibliometric analysis, current trends and gaps in the field of 3D cartography were identified, which contributed to the selection of suitable literature sources and helped to better specify the title and focus of the thesis. The subsequent literature review of the current state of the issue focused primarily on visual analysis, 3D geovisualization, and 3D data. Based on the bibliometric analysis and literature review, seven methods of 3D geovisualization of thematic data were defined – horizontal planes, point cloud, 3D surface, vertical planes, 3D graduated symbols, prism map, and voxels. All methods were evaluated in the context of visual variables (e.g., color, shape, extrusion, transparency). At the same time, various software tools were evaluated in terms of their suitability for creating a 3D geovisualization application, with ArcGIS Pro and ArcGIS Online being selected as the most suitable.

The core of the thesis lies in the design and subsequent technical implementation of a 3D geovisualization environment. In the first case study, an application was created using ArcGIS Online. However, this solution did not provide sufficient options for individual customization. For this reason, ArcGIS Maps SDK for JavaScript technology was used for the second case study. The created application served as a prototype for the final 3D geovisualization environment. The resulting web application, 3D-Geo-Vis 2.0, represents a comprehensive environment allowing users to add their own data, select visualization methods, directly manipulate visual variables, adjust the legend in real-time, and manage layers. Partial results were continuously evaluated through user testing to verify the usability of the application and individual visualization methods.

KEYWORDS

spatial; visualization; visual analysis; 3D

Number of pages: 131

Number of appendices: 4

Prohlašuji, že

- disertační práci včetně příloh jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- jsem si vědom, že na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,
- беру на ве́домі́, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, disertační práci užívat (§ 35 odst. 3),
- souhlasím, aby jeden výtisk disertační práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,
- souhlasím, že údaje o mé disertační práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,
- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé disertační práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- použít výsledky a výstupy mé disertační práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Mgr. Jakub ŽEJDLÍK

„The world is not in your books and maps, it's out there. ”

J. R. R. Tolkien (Gandalf Bilbovi ve filmu Hobit: Neočekávaná cesta)

*„So, I'm picking up the pieces now, where to begin?
The hardest part of ending is starting again. ”*

Linkin Park – Waiting for the End (A Thousand Suns, 2010)

Chtěl bych touto cestou poděkovat těm, kteří mě provázeli studiem **geoinformatiky a kartografie** na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci. Roky strávené na katedře budou vždy patřit k těm nejlepším v mém životě.

Děkuji školiteli **prof. RNDr. Vítu Voženílkovi, CSc.** za podnětné komentáře a připomínky při vypracování disertační práce, za akademickou, vědeckou a pracovní spolupráci, a za cenné rady do profesního života.

Děkuji **RNDr. Aleně Vondrákové, Ph.D., LL.M.** za skvělé vedení mé bakalářské a magisterské práce, díky kterému jsem se rozhodl pokračovat v doktorském studiu.

Děkuji spolužákům a kamarádům **Mgr. Oldřichu Bittnerovi** a **Mgr. Tomáši Vaníčkovi** za společnou cestu doktorátem plnou sdílených strastí i úspěchů, díky čemuž jsem vždy věděl, že v tom nikdy nejsem sám.

Děkuji také všem ostatním **kolegům** z katedry, kteří mi vždy ochotně poradili a pomohli, když bylo potřeba. Jejich akademické, vědecké a pracovní úspěchy pro mě byly motivací a vzorem, k němuž jsem se snažil v průběhu studia přibližovat. Jmenovitě bych chtěl poděkovat **Mgr. Radku Barvířovi, Ph.D.**, **Mgr. Jakubu Koníčkovi, Ph.D.**, **RNDr. Janu Brusovi, Ph.D.**, **doc. RNDr. Jaroslavu Burianovi, Ph.D.** a **doc. RNDr. Stanislavu Popelkovi, Ph.D.**

Děkuji **Českému hydrometeorologickému ústavu**, jmenovitě **RNDr. Radimu Tolaszovi, Ph.D.** a **Mgr. Adamu Valíkovi, Ph.D.**, za poskytnutí dat z předpovědního modelu ALADIN, jenž jsem využíval při tvorbě této práce.

V neposlední řadě děkuji také mé **rodině a přátelům**, jejichž podpora mi umožnila překonávat překážky studia a zároveň čerpat pozitivní energii ze společně strávených chvil.

Největší poděkování patří mé manželce **Nikol** za nekonečnou podporu a lásku, bez které bych těžko hledal motivaci studium dokončit.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	8
ÚVOD.....	9
1 CÍLE PRÁCE.....	10
2 METODY A POSTUP ŘEŠENÍ	12
3 BIBLIOGRAFICKÁ ANALÝZA	16
3.1 Identifikace (Identification).....	17
3.2 Screening	20
3.3 Vhodnost (Eligibility)	21
3.4 Zařazení (Inclusion).....	21
3.5 Přehled zahrnutých studií.....	21
3.6 Souhrn a východiska pro disertační práci	26
4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	27
4.1 Vizuální analýza a vizuální analytika.....	27
4.2 Percepce 3D prostoru	29
4.3 Geovizualizace a 3D geovizualizace	30
4.4 3D data	37
4.5 3D modely.....	41
4.6 Meteorologická a klimatická data	44
5 HORIZONTÁLNÍ ROVINY A VÝBĚR PROGRAMU.....	46
5.1 Kartografická sémologie ve 3D.....	46
5.2 Metody 3D geovizualizace ve formě horizontálních rovin	48
5.3 Vizualizace horizontálních rovin ve 3D prostředí různých programů	53
6 METODY 3D GEOVIZUALIZACE TEMATICKÝCH DAT.....	63
6.1 Metody 3D geovizualizace ve formě 3D datových reprezentací.....	63
6.2 Postup tvorby 3D geovizualizací z rastrových dat v ArcGIS Pro.....	73
7 INTEGRACE S MĚSTSKÝMI A VÝŠKOVÝMI 3D MODELÝ	79
7.1 Detailní měřítko (případová studie Jihlava)	79
7.2 Kontinentální měřítko (případová studie Evropa).....	91
8 GEOVIZUALIZAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO VIZUÁLNÍ ANALÝZU VE 3D.....	100
8.1 Popis aplikace 3D-Geo-Vis 2.0	100
8.2 Architektura aplikace	102
8.3 Popis vybraných částí kódu	103
8.4 Příklady využití aplikace 3D-Geo-Vis 2.0	107

9	VÝSLEDKY.....	110
10	DISKUZE.....	114
11	ZÁVĚR.....	117
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	119
	SUMMARY.....	130
	PŘÍLOHY	132

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
3D	trojrozměrný / trojdimenzionální
ALADIN	Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International (numerický model pro krátkodobou předpověď počasí)
API	Application Programming Interface
CSS	Cascading Style Sheets
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DEM	Digital Elevation Model
DMP	digitální model povrchu
DMR	digitální model reliéfu
DMT	digitální model terénu
GIS	geografický informační systém
GRIB	GRIBed Binary (datový formát používaný v meteorologii k ukládání historických a předpovědních údajů o počasí)
HTML	HyperText Markup Language
JS	JavaScript
JSON	JavaScript Object Notation
KML	Keyhole Markup Language
KMZ	Keyhole Markup Language Zipped
LOD	Level of Detail
OGC	Open Geospatial Consortium
RÚIAN	Registr územní identifikace, adres a nemovitostí
SDK	Software Development Kit
STC	Space-Time Cube
VR	virtuální realita

ÚVOD

Potřeba **umět se správně rozhodnout** byla pro lidstvo vždy **extrémně důležitá**. V každé éře lidské historie se lidé snažili nějakým způsobem zaznamenat, jak vnímají okolní svět. V pravěku naši předci na nástěnné malby zaznamenávali **prostorové rozmístění nepřátelských kmenů** nebo pravděpodobná **místa výskytu potravy**. Ve starověkém Řecku a Římě začaly kromě prvních map světa vznikat také **plány měst**, které sloužily k evidenci majetku a rozhodování o dalším rozšiřování měst. Středověcí mořeplavci používali pro námořní navigaci portolánové mapy, pomocí kterých mohli zjistit **nejkratší cestu do přístavu**. Novověká kartografie se nesla v duchu **mapování nově objevených částí světa** a tvorby stále většího množství map, atlasů a globů, které se později díky rozvoji zeměměřičství čím dál více zpřesňovaly.

Dnešní moderní doba lidem poskytuje o poznání pokročilejší možnosti pro **rozhodování na základě prostorových dat**. Technologie jako polohově založené služby, rozšířená a virtuální realita, 3D vizualizace nebo umělá inteligence umožňují uživatelům ve velmi krátkém čase poskytnout vše potřebné pro efektivní rozhodování. V posledních letech dochází v oblasti geoinformatiky a kartografie ve všech směrech k **významnému rozvoji – přibývají data**, která je nutné správně zpracovat, analyzovat a interpretovat, **programy**, které umožňují s těmito daty pracovat, **se neustále zdokonalují**, a **metody**, kterými mohou být tato data vizualizována, **poskytují nekonečné množství inovací**. Současný posun od statických médií k různým interaktivním zobrazovacím technologiím má **obrovský dopad** na design, produkci a používání digitálních map a dalších geovizualizací (Semmo et al., 2015).

Stále větší popularity se dostává vizualizací geografických dat ve 3D prostředí, tzv. **3D geovizualizaci**. Ta nabízí mnoho příležitostí nejen v geografických vědách, ale i v tematických oblastech jako je meteorologie, klimatologie, vědy o životním prostředí nebo urbanismus. **Trojrozměrné zobrazovací techniky** jsou obecně pro kartografii **velmi důležité**, a to nejen pro optimalizované vnímání georeliéfu, ale jsou nezbytné i pro vizualizaci dalších prostorových informací (Knust a Buchroithner, 2014). Trojrozměrná geovizualizace umožňuje v mnoha případech **přirozenější a intuitivnější vnímání geografických dat a jejich prostorových vztahů**, než by tomu bylo u klasické 2D vizualizace ve formě mapy. Ve 3D prostředí lze také kombinovat tematická a topografická data a zkoumat tak například rozložení teploty vzduchu nebo relativní vlhkost v kontextu městské zástavby. 3D geovizualizace umožňuje nejen realistické zobrazení prostředí, ale především poskytuje **nové způsoby interakce s prostorovými daty**. Její využití napomáhá efektivnější interpretaci složitých geografických jevů, což je klíčové pro řešení komplexních problémů, jako je plánování udržitelného rozvoje měst, ochrana přírodních ekosystémů nebo analýza dopadů klimatických změn.

Tato disertační práce se zaměřuje na **koncept, návrh metod a implementaci geovizualizačního prostředí pro vizuální analýzu ve 3D**. Definice metod 3D geovizualizace a jejich zhodnocení může pomoci geoinformatikům a kartografům s **volbou správné metody**, která je vždy závislá na charakteru dat a účelu výsledné vizualizace. Dynamické a interaktivní vizualizační prostředí umožňující vizuální analýzu ve 3D může odborníkům z různých tematických oblastí poskytnout **nový úhel pohledu** na jejich data a umožní jim **vyvodit závěry**, které by bez třetího rozměru mohly zůstat skryté.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem disertační práce je odvodit a ověřit **metody vizualizace tematických 3D dat** propojených s **městskými a výškovými 3D modely**. Primárně bude výzkum zaměřen na vizualizaci **meteorologických dat** generovaných předpovědními modely ČHMÚ. Předmětem kartografického výzkumu budou **způsoby vizualizace 3D dat** v městských a výškových 3D modelech pomocí 2D a 3D datových reprezentací (např. horizontální roviny, 3D povrchy). Následně budou ověřena sémiologická pravidla (parametry 2D i 3D vyjadřovacích prostředků, včetně využití barev ke zlepšení vizualizace) s cílem **zlepšit vizuální analýzu** znázorňovaných témat. Geoinformatický výzkum se zaměří na preprocessing a data management testovaných dat, testování 3D datových reprezentací, analytickou funkcionalitu a publikování vytvořených vizualizací. Disertační výzkum se bude opírat o spolupráci s odborníky na modelování a simulace Českého hydrometeorologického ústavu a k testování budou využívána jejich data. Výzkum bude směřovat k **formulování postupu tvorby vizualizací tematických 3D dat** a návrhu **3D geovizualizačního prostředí**, které umožní efektivní **vizuální analýzu**.

Pro hlubší verifikaci stanovených cílů a ověření přínosu disertační práce je nezbytné formulovat konkrétní **hypotézu** a **výzkumné otázky**. Zatímco cíle práce definují praktické a metodické výstupy, výzkumné otázky se zaměřují na teoretické aspekty vizuální analýzy a hodnocení efektivity výsledného 3D geovizualizačního prostředí.

- **H:** Aktivní a cílená manipulace s grafickými proměnnými v interaktivním 3D geovizualizačním prostředí umožňuje efektivní vizuální analýzu tematických dat a identifikaci prostorových vztahů a vzorů, jež jsou při použití tradičních metod 2D kartografie skryté nebo zkrácené.
- **RQ1:** Jaké grafické proměnné jsou při vizuální analýze ve 3D nejvýznamnější?
- **RQ2:** Jaké metody 3D geovizualizace jsou nejefektivnější pro vizuální analýzu tematických dat?
- **RQ3:** Jakou funkcionalitu a nástroje musí obsahovat 3D geovizualizační prostředí, aby podporovalo efektivní vizuální analýzu 3D dat?

Dílčí cíl 1 – Horizontální roviny a výběr programu

Předmětem prvního dílčího cíle bude **vizualizace horizontálních rovin** prostorových dat v prostředí vybraných programů, především ArcGIS Pro, QGIS, Unity, Blender, případně jiných. Cílem testování bude vybrat program, který prokáže nejvíce výhod pro vizuální analýzu. Součástí cíle bude v tomto programu pomocí **hodnocení sémiologických pravidel** (Bertin, 1967; MacEachren, 2004) zjistit optimální způsoby vizualizace horizontálních rovin. Primárním zdrojem pro 3D vizualizace a jejich analýzy budou **data předpovědního modelu ALADIN**. Poznatky z prvního dílčího cíle budou zohledněny při řešení následujících dílčích cílů za účelem zlepšení vizuální analýzy prostorových 3D dat.

Dílčí cíl 2 – Metody 3D geovizualizace tematických dat

Předmětem druhého dílčího cíle bude testování různých způsobů vizualizace dat modelu ALADIN, případně dalších prostorových 3D dat, **ve formě 3D datových reprezentací** v programu vybraném v předchozím dílčí cíli. Hlavním cílem bude hodnocením sémiologických pravidel zjistit **optimální způsoby vizualizace** poskytnutých dat pomocí 3D datových reprezentací. Předpokladem je rozšíření horizontálních rovin o třetí (výškový) rozměr, umožňující efektivnější manipulaci a vizuální analýzu. Snahou bude umožnit porovnávání vzájemných vztahů různých meteorologických veličin, případně jejich zobrazení v různých výškových nebo tlakových hladinách. Pro vytvořené vizualizace budou **hodnocena sémiologická pravidla** (parametry 2D i 3D vyjadřovacích prostředků). Součástí cíle bude formulace **postupu tvorby vizualizací** tematických 3D dat.

Dílčí cíl 3 – Integrace s městskými a výškovými 3D modely

Předmětem třetího dílčího cíle bude doplnění vytvořených 3D vizualizací meteorologických dat o **městské a výškové 3D modely**. Integrací je myšlen proces syntézy heterogenních prostorových dat do jednotného 3D geovizualizačního prostředí za účelem společné vizuální analýzy. Cílem bude umožnit vizuální analýzu integrovaných 3D modelů **v různých měřítkách**:

- vizuální analýza městských 3D modelů **v detailním měřítku** zaměřená na vztahy mezi městským prostředím a meteorologickými prvky (zejména prostorové rozmístění a výška budov),
- vizuální analýza výškopisných dat **v kontinentálním měřítku** ve formě digitálního modelu terénu zaměřená na vztahy mezi georeliéfem a meteorologickými prvky (například vztah teploty a nadmořské výšky, resp. zeměpisné šířky).

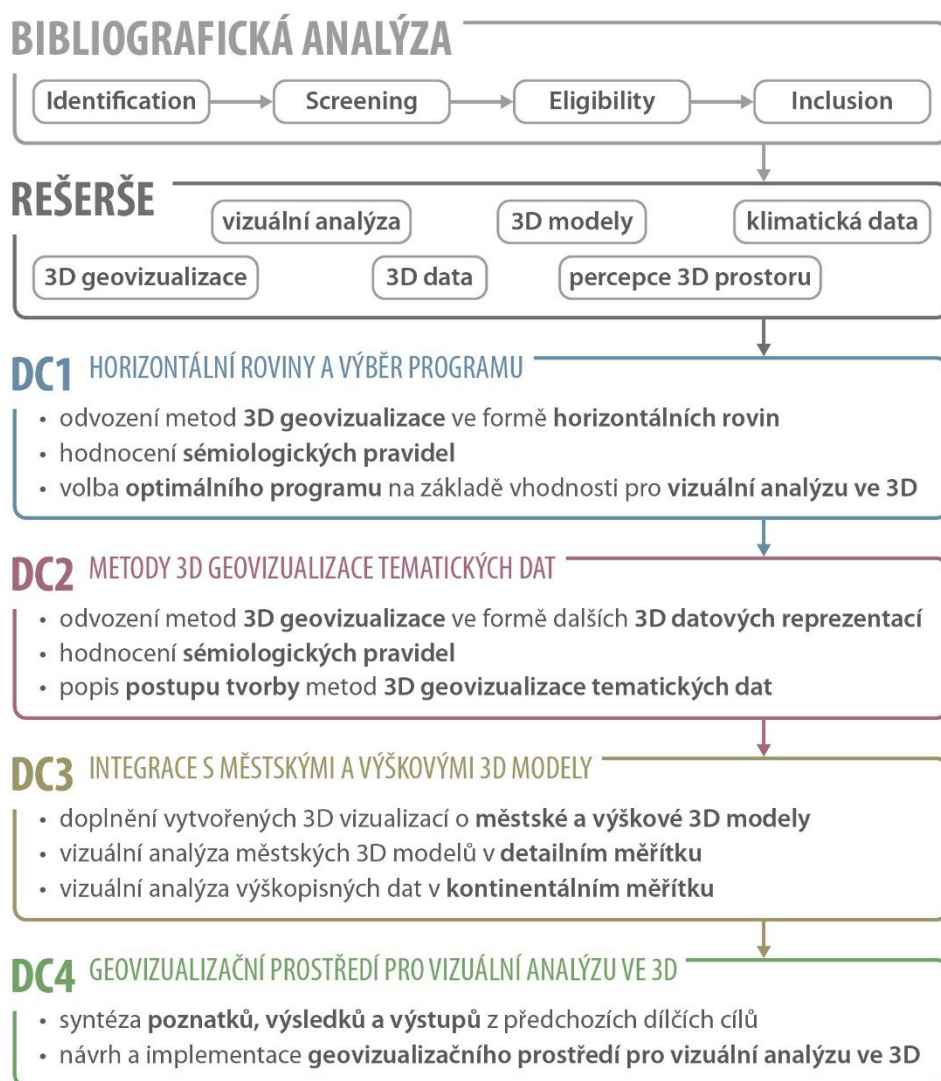
Pro obě měřítka budou testovány nejvhodnější metody 3D vizualizace. Snahou bude umožnit přepínání všech vrstev v prostředí vybraného programu podle preferencí uživatele.

Dílčí cíl 4 – Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D

Předmětem posledního dílčího cíle je **syntézou poznatků, výsledků a výstupů** z předchozích dílčích cílů navrhnout a implementovat **3D geovizualizační prostředí pro efektivní vizuální analýzu** tematických 3D dat. Snahou je, aby navržené 3D vizualizační prostředí umožňovalo práci se všemi vytvořenými 3D vizualizacemi a poskytlo účinné nástroje vizuální analýzy, zejména filtrování vrstev, případně analytické funkce.

2 METODY A POSTUP ŘEŠENÍ

Postup řešení disertační práce je definován **pěti kroky** – **rešerší současného stavu problematiky** (které předcházela bibliografická analýza) a **čtyřmi dílčími cíli** (obr. 1). Jednotlivé kroky na sebe **systematicky navazují** a směřují k návrhu a implementaci geovizualizačního prostředí pro vizuální analýzu ve 3D.



Obr. 1: Schéma postupu řešení disertační práce

Bibliografická analýza

Bibliografická analýza metodou PRISMA hraje klíčovou roli při výběru vhodných zdrojů pro další části výzkumu na základě systematického přehledu relevantních článků. Díky systematickému přehledu zdrojů bude následně možné vypracovat, případně rozšířit rešerši práce a vytvořit tak kvalitní teoretický základ. Souhrn metod 3D geovizualizace použitých v různých studiích a článcích umožní identifikovat nepoužívanější metody současnosti, případně vývoj používání metod v čase. Tyto poznatky mohou být poté zhodnoceny v kontextu vizuální analýzy ve 3D a zohledněny v následném návrhu vizualizačního prostředí.

Rešerše

Podrobná rešerše literatury byla provedena zejména s využitím **online zdrojů**, mezi které patřily odborné články, závěrečné práce a odborné články na internetu (tab. 1). Pro co nejvyšší efektivitu studia relevantní literatury byly zdroje vyhledávány podle následujícího klíče:

- odborné články v databázích Web of Science, Scopus, Science Direct a ResearchGate podle klíčových slov
- odborné články v kartografických a geoinformatických časopisech od roku 2000, jejichž název souvisí s některým z klíčových slov
 - International Journal of Cartography
 - The Cartographic Journal
 - Cartography and Geographic Information Science
 - Cartographica
 - Kartografické listy
- back rešerše – literatura uvedená v odborných člancích, jež souvisí s některým z klíčových slov
- závěrečné práce evidované v systému Theses.cz
- další zdroje literatury, jako jsou odborné monografie, učebnice kartografie a geoinformatiky, konferenční sborníky, příspěvky na konferencích nebo webové stránky

Tab. 1: Počet vyhledaných záznamů podle klíčových slov ve vybraných databázích (k září 2025)

	spatial	visualization	geovisualization	visual analysis	3D
Web of Science	2 078 989	359 576	987	267 759	1 586 598
Scopus	2 771 764	474 430	1 426	506 380	2 170 840
Science Direct	445 104	> 1 000 000	605	> 1 000 000	> 1 000 000
Theses.cz	971	988	233	924	991

Mezi nejvýznamnější zdroje, které výrazně pomohly pochopit problematiku prostorové 3D vizualizace a vizualizace meteorologických dat patří článek **Visualizing 3D Climate Data in Urban 3D Models** (Gautier et al., 2020b), článek **3D Geovisualization for Visual Analysis of Urban Climate** (Christophe et al., 2022) a některé kapitoly disertační práce Filipa Biljeckého s názvem **Level of Detail in 3D City Models** (Biljecki, 2017). Mezi další významné práce patří např. kniha **True-3D in Cartography** (Buchroithner a Knust 2013) nebo článek **Geovisualization** (Çöltekin et al., 2018). Mezi významné zdroje od českých autorů patří článek **The Third Dimension in Noise Visualization – a Design of New Methods for Continuous Phenomenon Visualization** (Beran et al., 2022).

Metody řešení dílčího cíle 1 – Horizontální roviny a výběr programu

Pro testování **vizualizace horizontálních rovin** budou využity vybrané programy, a to jak **geografické informační systémy** (např. ArcGIS Pro, QGIS), tak **programy určené pro modelování a vizualizaci 3D dat** (např. Unity, Blender), případně další programy vhodné pro tento účel. Horizontální rovinou je myšlen způsob znázornění rastrových prostorových dat, kdy má celá datová reprezentace konstantní Z souřadnici, a liší se pouze vyjadřovacími prostředky (např. barvou buňky). Způsobem znázornění horizontální roviny ve vizualizačním prostředí může být např. vizualizace jedné roviny, vizualizace více rovin v různých výškových hladinách (bez průhlednosti, s průhledností) nebo překrytí více rovin na stejné výškové úrovni. Optimální způsoby vizualizace budou **testovány z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu** (které vyjadřovací prostředky jsou vhodné pro danou vizualizaci apod.). Vizuální analýzou je myšlena analýza (prostorových) dat provedená na základě vizuálního vjemu (Robinson, 2017). Jedná se o typ analýzy, která nemusí být nutně podložena čísly (např. vizuální porovnání několika map, které mají stejnou tematiku, ale liší se v čase nebo prostoru). Sémiologická pravidla (barva, intenzita, průhlednost apod.) budou hodnocena dle vybraných přístupů (Bertin, 1967; MacEachren, 2004).

Pro potřeby disertační práce byla Českým hydrometeorologickým ústavem poskytnuta **data předpovědního modelu ALADIN** ve formátu **GRIB**. ALADIN je numerický model počasí, vyvíjený od roku 1991 francouzskou meteorologickou službou Météo-France ve spolupráci se zainteresovanými zeměmi. Poskytnutá data jsou dostupná za rok 2014 po hodinách, pokrývají téměř celou Evropu a obsahují **různé meteorologické veličiny** (např. teplota, vlhkost, rychlost větru) v několika výškových a tlakových hladinách. Případně budou data dále poskytována i pro další roky. GRIB je rastrový datový formát běžně používaný v meteorologii k ukládání historických a předpovědních dat o počasí.

Metody řešení dílčího cíle 2 – Metody 3D geovizualizace tematických dat

Vizualizace prostorových 3D dat **ve formě 3D datových reprezentací** bude probíhat v prostředí programu vybraném na základě poznatků z prvního dílčího cíle. 3D datovou reprezentací je myšlen způsob vizualizace rastrových prostorových dat, kdy je Z souřadnice proměnlivá na základě hodnot. Způsobem znázornění 3D datových reprezentací ve vizualizačním prostředí mohou být např. souvislé 3D povrchy nebo vizualizace pomocí voxelů. **Optimální způsoby vizualizace a sémiologická pravidla** budou hodnocena obdobným způsobem jako v předchozím dílčím cíli se zohledněním třetí dimenze. Snahou je porovnávat vrstvy na stejné výškové úrovni, nebo je zobrazit v konkrétních výškových, resp. tlakových hladinách.

Metody řešení dílčího cíle 3 – Integrace s městskými a výškovými 3D modely

Předpokládá se, že v programu vybraném v dílčím cíli 1 a testovaném v dílčím cíli 2, budou **integrována data meteorologických** (případně jiných tematických), **městských a výškových 3D modelů** formou **společné 3D vizualizace**. Integrace všech tří druhů modelů (tematické, městské, výškové) bude realizována zohledněním jednotného souřadnicového systému, prostorového rozlišení, jednotného znakového klíče a dalších aspektů. **Kontinentální měřítko** je odvozeno od rozsahu dat předpovědního modelu ALADIN, tj. velká část Evropy. **Detailní měřítko** bude určeno podle dostupnosti dat na úrovni města střední velikosti v Česku, např. Olomouc, Ostrava aj.

Pro vizuální analýzu městských 3D modelů v detailním měřítku budou dostupná **data budov** reprezentovaných jejich prostorovou lokalizací, výškou a dalšími atributy, případně bude úroveň detailů zvýšena (např. tvar střechy, okna, textury). Pro vizuální analýzu výškových 3D modelů v kontinentálním měřítku budou použita **data digitálního modelu terénu** (např. SRTM, GTOPO30). Pro vizuální analýzu výškových 3D modelů v detailním měřítku budou použity podrobnější digitální modely terénu (např. DMR5G). Pro obě měřítka bude **ověřena použitelnost** optimálních metod vizualizace a sémiologických pravidel, vyplývajících z výsledků předchozích dílčích cílů.

Metody řešení dílčího cíle 4 – Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D

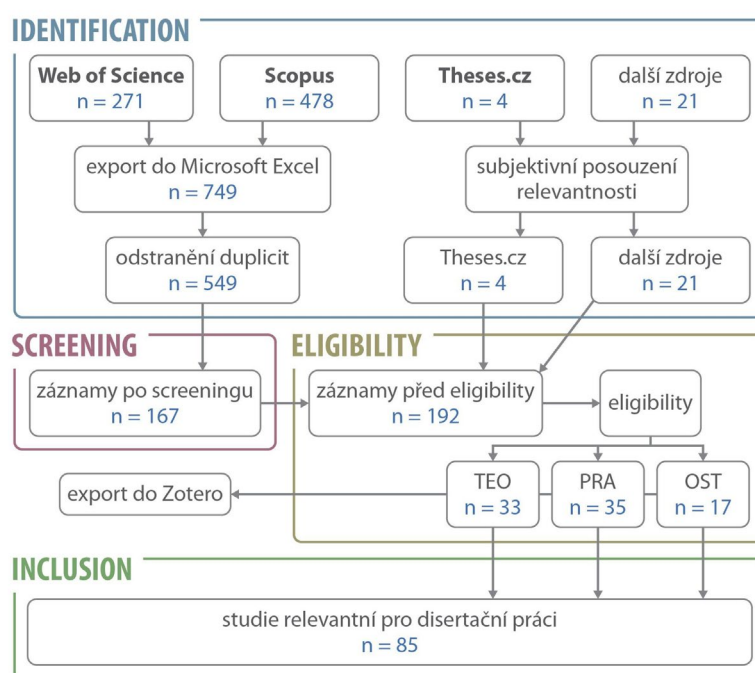
3D geovizualizační prostředí chápáné jako **prostředí umožňující interaktivní vizualizaci 3D dat a jejich následnou vizuální analýzu** bude vytvářeno v programu vybraném v předchozích dílčích cílech (např. Unity). Do prostředí budou **zaintegrovány tematické** (meteorologické veličiny, případně další data) **a pomocné vrstvy** (digitální model terénu, 3D modely budov). Analytická funkcionalita, filtrování vrstev, úpravy vizualizace apod. budou zprostředkovány v závislosti na možnostech programu. 3D vizualizační prostředí bude navrženo buď jako nadstavba v rámci existujícího programu (předpokládá se v programu vybraném v předchozích dílčích cílech) nebo jako výsledek softwarového vývoje.

3 BIBLIOGRAFICKÁ ANALÝZA

Systematický přehled literatury související s tématem práce, resp. jejími klíčovými slovy, byl vypracován pomocí metodiky **PRISMA** – Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (Page et al., 2021). Metodika PRISMA v roce 2009 nahradila původní metodiku QUOROM. Prohlášení PRISMA se skládá z **kontrolního seznamu o 27 položkách** a **čtyřfázového vývojového diagramu**. Kontrolní seznam obsahuje položky, které jsou považovány za nezbytné pro transparentní vykazování systematického přehledu (Liberati et al., 2009). V roce 2021 byla vydána metodika PRISMA 2020, která poskytuje aktualizované pokyny pro podávání zpráv o systematických přehledech, které odrážejí pokrok v metodách identifikace, výběru, hodnocení a syntézy studií (Page et al., 2021). Vývojový diagram metody PRISMA se skládá ze čtyř elementů (Research Square Company, 2024):

1. **identification (identifikace)** – studie zjištěné z různých zdrojů, jako jsou např. vědecké databáze,
2. **screening** – studie zbývající po odstranění duplicit a po vyřazení na základě názvu nebo abstraktu,
3. **eligibility (vhodnost)** – studie zbývající po vyřazení na základě obsahu a definovaných kritérií,
4. **inclusion (zařazení)** – studie relevantní pro disertační práci.

Na obrázku 2 je znázorněno **schéma tvorby systematického přehledu literatury**. Postup tvorby přehledu je rozdělen do čtyř na sebe navazujících fází, které vycházejí z vývojového diagramu metody PRISMA. Nejprve došlo k **identifikaci studií** z vědeckých databází a dalších zdrojů na základě klíčových slov a definovaných kritérií (identification), přičemž byly **odstraněny duplicitní a nerelevantní studie**. Poté byly **vyřazeny studie**, které se nejevily jako relevantní na základě názvu nebo abstraktu (screening), případně na základě obsahu a definovaných kritérií (eligibility). V této fázi byly také **studie rozděleny do kategorií** podle jejich zaměření. Výsledkem je přehled studií relevantních pro disertační práci (inclusion).



Obr. 2: Schéma tvorby systematického přehledu literatury a metod 3D geovizualizace (upraveno dle PRISMA, 2024)

3.1 Identifikace (Identification)

První fází bibliografické analýzy je **identifikace**. Pro identifikaci relevantních studií byly využity databáze vědeckých článků **Web of Science (WoS)** a **Scopus**. Dále byly do identifikace zahrnuty vysokoškolské kvalifikační práce ze systému **Theses.cz**, který slouží zejména pro odhalování plagiátů mezi závěrečnými pracemi ([Fakulta informatiky MU, 2024](#)). V poslední řadě byly zohledněny také články doporučené školitelem a kolegy, případně další zdroje. U zdrojů s vysokou relevancí byly prozkoumány i zdroje uvedené v seznamu použité literatury (tzv. citation chaining, resp. backward citation). Zdroje byly vyhledávány na základě předem definovaných klíčových slov a kritérií.

Klíčová slova byla vydefinována na základě názvu práce (obr. 3). Následně byla klíčová slova použita pro vyhledávání ve vědeckých databázích, přičemž výsledky vyhledávání poskytly alternativní klíčová slova a pomohly zvolit vhodná kritéria. Identifikace probíhala na přelomu března a dubna roku 2024, a nejsou v ní tedy zahrnuty studie mladší. Pro identifikaci byla zvolena následující kritéria:

- **prostorový**: spatial, geographic, geographical,
- **vizualizace**: visualization, visualizations, geovisualization, geovisualizations,
- **vizuální analýza**: visual analysis, visual analytics, geovisual analytics,
- **3D**: 3D, three dimensional, three-dimensional.

Původně byla uvažována také klíčová slova „geovizualizace“ a „vizualizační prostředí“. Jejich zařazení do dotazu ale způsobovalo velké množství nerelevantních výsledků, nebo naopak velmi málo výsledků. Klíčové slovo „geovizualizace“ bylo proto rozděleno na „prostorový“ a „vizualizace“, a „vizualizační prostředí“ bylo vyřazeno. Tyto úpravy velmi pomohly zpřesnit vyhledávání.

GEOVIZUALIZAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO VIZUÁLNÍ ANALÝZU VE 3D: KONCEPT, METODY, IMPLEMENTACE

GEO (PROSTOROVÝ) • VIZUALIZACE • VIZUÁLNÍ ANALÝZA • 3D

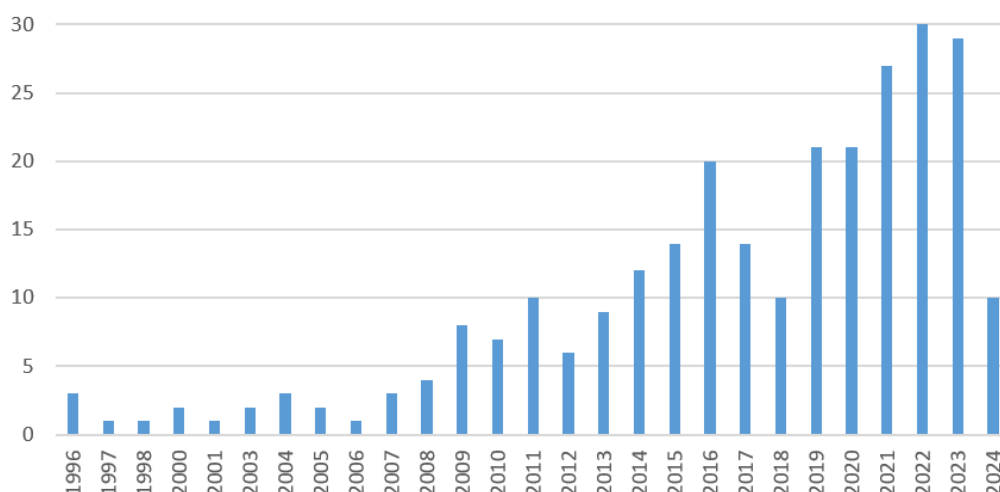
Obr. 3: Definování klíčových slov na základě názvu práce

Web of Science

Web of Science umožňuje dvě formy vyhledávání záznamů. Pro jednoduché vyhledávání (*Basic Search*) je možné ručně zvolit např. téma, autora, rok vydání nebo jazyk. Pro bibliografickou analýzu je ale vhodné použít pokročilé vyhledávání (*Advanced Search*). To umožňuje vyhledávání formou jednoduchého strukturovaného dotazu (*query*), a je tedy možné do dotazu zakomponovat definovaná klíčová slova a kritéria. Dotaz pro vyhledání zdrojů relevantních pro disertační práci byl sestaven následovně:

(TS=(spatial) OR TS=(geographic) OR TS=(geographical)) AND (TS=(visualization) OR TS=(visualizations) OR TS=(geovisualization) OR TS=(geovisualizations)) AND (TS=(visual analysis) OR TS=(visual analytics) OR TS=(geovisual analytics)) AND (TS=(3D) OR TS=(three dimensional) OR TS=(three-dimensional))

Na základě kritérií byly prohledány názvy, abstrakty nebo klíčová slova, přičemž přesné dodržení kritérií bylo zajištěno volbou „exact search“. Z výsledků byly vyfiltrovány pouze články (articles). Výsledkem vyhledávání bylo **271 článků** publikovaných v letech 1996 až 2024 (obr. 4).



Obr. 4: Počty článků identifikovaných z databáze Web of Science v jednotlivých letech

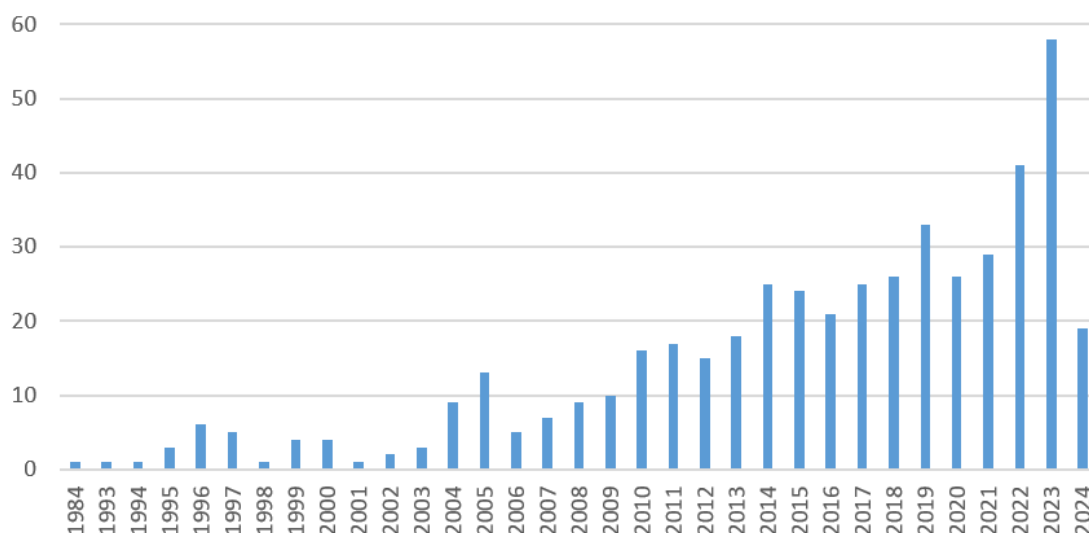
Takto vyhledané články byly následně zanalyzovány v prostředí WoS, přičemž nejčastější kategorie byly *Computer Science Software Engineering* (29,3 %), *Engineering Electrical Electronic* (11,1 %), *Computer Science Information Systems* (10,7 %), *Geosciences Multidisciplinary* (8,9 %) a *Computer Science Interdisciplinary Applications* (8,5 %). Z autorů byli nejčastěji zastoupeni Westermann (7×), Gröller (6×), Kozlíková (5×) a Linsen (5×). Nejvíce článků (30) bylo publikováno v roce 2022, následují roky 2023 (29 článků) a 2021 (27 článků). Dále článků směrem do minulosti logicky postupně ubývá. Z vydavatelů byli nejvíce zastoupeni *IEEE* (24,4 %), *Elsevier* (14,1 %), *Wiley* (11,5 %), *MDPI* (8,5 %) a *Springer Nature* (8,5 %). Z hlediska afiliace je nejhojněji zastoupena Čínská akademie věd a Technická univerzita ve Vídni. Nejvíce článků pochází z USA (30,7 %), Číny (27 %), Německa (18,9 %) a Rakouska (5,6 %).

Scopus

Scopus umožňuje podobně jako WoS jednoduché nebo pokročilé vyhledávání. Ve vyhledávacím dotazu byla použita stejná kritéria, jako v případě WoS, pouze byl dotaz upraven, aby odpovídal struktuře Scopus:

(TITLE-ABS-KEY(spatial) OR TITLE-ABS-KEY(geographic) OR TITLE-ABS-KEY(geographical)) AND (TITLE-ABS-KEY(visualization) OR TITLE-ABS-KEY(visualizations) OR TITLE-ABS-KEY(geovisualization) OR TITLE-ABS-KEY(geovisualizations)) AND (TITLE-ABS-KEY(visual analysis) OR TITLE-ABS-KEY(visual analytics) OR TITLE-ABS-KEY(geovisual analytics)) AND (TITLE-ABS-KEY(3D) OR TITLE-ABS-KEY(three dimensional) OR TITLE-ABS-KEY(three-dimensional))

Na základě kritérií byly prohledány názvy, abstrakty nebo klíčová slova, a z výsledků byly vyfiltrovány pouze články (articles). Výsledkem vyhledávání bylo **478 článků** publikovaných v letech 1984 až 2024 (obr. 5). Analýza vyhledávání na Scopus přinesla velmi podobné výsledky, jako v případě WoS.



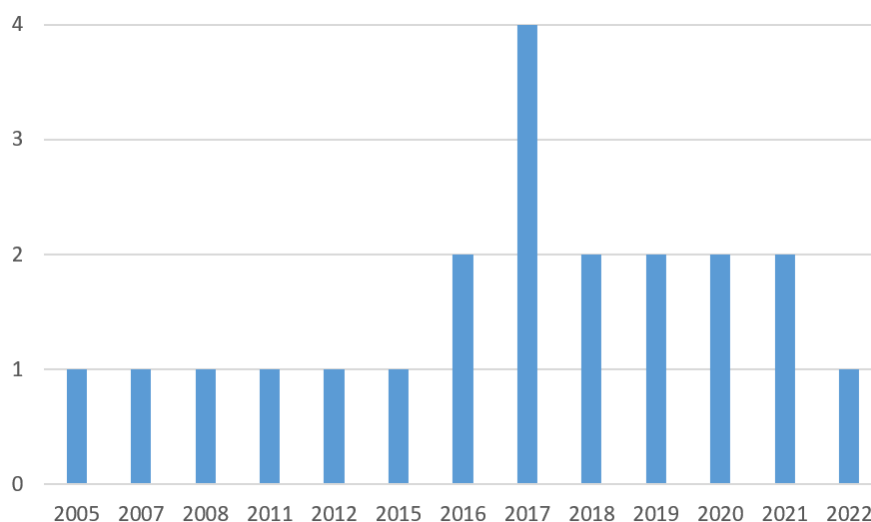
Obr. 5: Počty článků identifikovaných z databáze Scopus v jednotlivých letech

Theses.cz

Kromě databází vědeckých článků byla pomocí kombinace klíčových slov prohledána také databáze vysokoškolských kvalifikačních prací **Theses.cz**. Po filtraci prací na základě názvu, abstraktu a obsahu textu, byly identifikovány **4 relevantní práce**: *User Issues of Interactive 3D Geovisualizations* (Herman, 2018), *Dynamické grafické proměnné ve 3D mapách* (Krejčí, 2018), *Vliv třetího rozměru na využití kartografické vizualizace* (Faltejsková, 2019) a *Vliv interakce na práci s tematickými 3D mapami* (Vrbka, 2022). Všechny práce byly úspěšně obhájeny.

Další zdroje

Další zdroje byly získány na základě doporučení školitele a kolegů. Jedná se o studie, které nemusí nutně odpovídat zvoleným klíčovým slovům a kritériím, nicméně je vhodné je do disertační práce začlenit. Příkladem jsou studie Bleisch (2012), Robinsona (2017), Rotha (2017) nebo Bandrove (2005). Prohledány byly také vybrané významné kartografické či geoinformatické časopisy (např. *International Journal of Cartography*, *Journal of Maps*) za účelem minimalizace možnosti opomenutí nějakého relevantního zdroje. Klíčová slova byla vložena také do vyhledávačů odborné literatury **Google Scholar**, **Semantic Scholar** a nástroje **Connected Papers**. Tato řešení však neumožňují hromadný export článků, a proto byly využity pouze pro manuální vyhledávání dalších potenciálně relevantních zdrojů. U vybraných studií byly prozkoumány také zdroje uvedené v jejich seznamu literatury, případně další zdroje navržené formou „*You may also like...*“, která se nachází v postranním panelu na Web of Science. Takto získané materiály byly přijaty nebo vyřazeny na základě názvu, abstraktu nebo obsahu textu. Tímto způsobem bylo získáno **21 relevantních studií** (obr. 6).



Obr. 6: Počty studií získaných z dalších zdrojů v jednotlivých letech

3.2 Screening

Po identifikaci byly články odpovídající kritériím vyexportovány. Jednalo se o **271 článků** z Web of Science ve formátu XLS, **478 článků** z databáze Scopus ve formátu CSV a **4 kvalifikační práce** z databáze Theses.cz ve formátu PDF. Studie byly exportovány s jejich názvy, abstrakty, jmény autorů, roky publikování a DOI. Záznamy z WoS a Scopus byly agregovány do jednoho listu v *Microsoft Excel*, kdy jeden řádek odpovídal jedné studii s odpovídajícími atributy. Následně byly pomocí podmíněného formátování vyhledány duplicitní záznamy, přičemž bylo **smazáno 200 totožných článků**. U zbylých **549 článků** poté proběhl **screening**. Na základě názvu a abstraktu byly články ohodnoceny z hlediska relevantnosti (obr. 7):

- 2 – relevantní článek,
- 1 – potenciálně relevantní článek,
- 0 – nerelevantní článek.

Nerelevantní články byly vyřazeny ihned, u potenciálně relevantních článků byl jejich obsah podrobněji prozkoumán, a poté označen buď za relevantní, nebo nerelevantní. Během screeningu bylo **vyřazeno 382 článků**. Vyřazení přibližně 2/3 článků bylo způsobeno tím, že velké množství výsledků se sice zabývalo 3D geovizualizací, nicméně poněkud v jiném kontextu, než je vhodné pro disertační práci (např. geologie – mapování pod zemským povrchem, urbanismus – 3D modely budov, architektura, inženýrské sítě). Byly tedy zachovány pouze články, které splňovaly alespoň jedno z následujících kritérií:

- zabývají se 3D geovizualizací v kontextu tematických dat vyjma geologických (např. meteorologická, environmentální),
- používají metody 3D geovizualizace (např. 3D kartodiagramy, 3D povrchy, space-time cube),
- popisují technologie nebo postup tvorby 3D geovizualizací (např. virtuální glóby, analytické funkce, obohacení o další data).

Část článků byla také vyřazena proto, že nebyl dostupný jejich plný text, případně byly v jiném než českém nebo anglickém jazyce. Do další fáze prošlo **167 relevantních článků** z databází WoS a Scopus.

Relevance	Authors	Year	Title	Abstract	DOI
1	Moore A.B.; Bricke	2015	'Mountains of work': spatialization of work projects in a virtual	The challenge of successfully managing multiple work proje	10.1080/19475683.2015.105722
2	Vrotsou, K; Forsell	2010	2D and 3D representations for feature recognition in time geo	Time geographical representations are becoming a common	10.1057/ivs.2009.30
2	Zhang X.; Zhu Q.; V	2004	3D city models based spatial analysis to urban design	Urban design is a subject that is concerned with the shape, t	10.1080/10824000409480658
2	Christophe S.; Gau	2022	3D geovisualization for visual analysis of urban climate; [3D G	This paper is about the relevance of proposing geovisualizat	10.4000/cybergeog.38518
1	Bai M.	2024	3D Rendering and Optimization Algorithm for Landscape Arch	Digital city is to realize digitalization, automation and netwo	10.14733/cadaps.2024.S3.32-46
0	Gao, DL	2009	3D seismic volume visualization and interpretation: An integr	One of the major problems in subsurface seismic exploratio	10.1190/1.3002915
0	Pérez Benedito J.L.	2006	3D urban virtual model generation oriented towards driving si	Computer graphics and disciplines related to 3D reconstruc	
2	Dunbar M.D.; Mosl	2004	3D visualization for the analysis of forest cover change	Visualization techniques have been developed to recreate n	10.1080/10106040408542310
0	Suen I.-S.; Borich	2004	3D visualization in community-based planning	A new wave of recently developed Geographic Information S	

Obr. 7: Ukázka hodnocení relevantnosti článků na základě názvu a abstraktu

3.3 Vhodnost (Eligibility)

Do **vhodnosti** vstupovalo **167** článků, které prošly screeningem, **4** kvalifikační práce z Theses.cz a **21** studií získaných z dalších zdrojů. V této fázi byly materiály podrobněji hodnoceny z hlediska relevantnosti na základě jejich obsahu, přičemž byly zpětně vyhledány v databázích za účelem zobrazení plného textu, a následně proběhlo kódování relevantnosti opět v prostředí *Microsoft Excel*. Vyřazeny byly články, které se nejprve na základě názvu či abstraktu jeví jako vhodné, ale po podrobnějším prozkoumání obsahu textu byly shledány jako nerelevantní. U studií, které prošly fází eligibility, a byly tedy shledány jako vhodné pro disertační práci, byla jejich data exportována do citačního manažeru **Zotero**. Vzhledem k tomu, že některé zdroje byly přínosné z teoretického, a některé z praktického hlediska, byly výsledky rozděleny do tří kategorií:

- **TEO:** studie je přínosná zejména svou teoretickou částí, a je vhodné ji začlenit do řešerše,
- **PRA:** studie je přínosná zejména svou praktickou částí (např. metody geovizualizace, technologie), a je vhodné ji začlenit do praktické části práce,
- **OST:** studie, jejíž přínos není vyloženě praktický nebo teoretický, ale přesto je pro práci relevantní.

3.4 Zařazení (Inclusion)

Do poslední fáze bibliografické analýzy – **zařazení** – se dostalo **85 zdrojů**, které splnily veškerá kritéria, a jsou tedy relevantní pro disertační práci. Do kategorie zdrojů vhodných pro teoretickou část (TEO) bylo zahrnuto **33 studií**. Tyto studie se věnují například uživatelským aspektům nebo principům 3D geovizualizace a vizuální analýzy. Do kategorie zdrojů vhodných pro praktickou část (PRA) bylo zařazeno **35 studií**. V těchto studiích jsou zpravidla použity různé metody 3D geovizualizace, popsán postup tvorby jednotlivých metod, nebo zhodnoceny výhody a nevýhody různých přístupů a technologií. Zbýlých **17 studií** bylo klasifikováno do kategorie „ostatní“ (OST). Tyto studie nejsou pro disertační práci stěžejní, ale i přesto mohou být přínosné.

3.5 Přehled zahrnutých studií

Výsledkem bibliografické analýzy je **přehled studií relevantních pro disertační práci** (tab. 2), který byl vypracován podle metodiky PRISMA. U studií je uvedeno stručné téma a použité metody 3D geovizualizace. Tento seznam je možné v budoucnu dále rozšiřovat o další relevantní literaturu.

Tab. 2: Přehled studií zahrnutých do práce na základě bibliografické analýzy

STUDIE (ROK)	KATEGORIE	TÉMA	METODA 3D GEOVIZUALIZACE
Kapler a Wright (1997)	TEO	geovizualizace času	space-time cube
Mitas et al. (1997)	TEO	krajinné procesy	3D povrch
Kreuseler (2000)	OST	multidimenzionální data	3D povrch
Dunbar et al. (2004)	OST	změna lesního pokryvu	3D modely ze snímků (fotogrammetrie)
Bandrova (2005)	OST	3D mapy	3D modely
Andrienko et al. (2007)	TEO	geovizuální analytika	-
Häberling et al. (2008)	TEO	3D mapy	3D mapa
Simões et al. (2009)	PRA	3D geovizualizace na webu	-
Sheppard a Cizek (2009)	PRA	Google Earth	virtuální glóbus, tematická data
Wu et al. (2010)	PRA	virtuální glóby pro územní plánování	virtuální glóbus, 3D modely
Demsar a Virrantaus (2010)	TEO	vizualizace pohybu osob	space-time density
Bleisch (2011)	PRA	3D geovizualizace kvantitativních dat	3D kartodiagramy
Zhang et al. (2011)	TEO	3D GIS	3D modely
Krishnan et al. (2012)	OST	vizuální analýza environmentálních dat	3D povrch, heatmap
Mitasova et al. (2012)	PRA	digitální modely terénu	3D povrch
Rink et al. (2012)	PRA	vizuální analýza hydrologických dat	TIN, 3D povrch, 3D kartodiagram
Bleisch (2012)	TEO	3D geovizualizace	3D kartodiagram
Zhu et al. (2014)	OST	3D geovizualizace Země	virtuální glóbus
An et al. (2014)	PRA	kvalita ovzduší	horizontální roviny, 3D šipky, 3D kartodiagram

Liang et al. (2014)	PRA	atmosférická data	virtuální glóbus, voxely, 3D povrchy
Tateosian et al. (2014)	TEO	pobřežní terén	space-time cube, 3D povrchy
Chang et al. (2015)	OST	plánování cest	virtuální glóbus
Yin et al. (2015)	OST	vizualizace protržení přehrad	virtuální glóbus
Rautenhaus et al. (2015)	PRA	předpověď počasí	space-time cube, 3D povrchy, 3D kartodiagramy
Semmo et al. (2015)	PRA	3D geovizualizace	3D modely
Ujang et al. (2015)	TEO	kvalita ovzduší ve městech	-
Bleisch a Dykes (2015)	TEO	3D geovizualizace kvantitativních dat	3D kartodiagramy
Yu et al. (2016)	OST	virtuální glóby pro geologické katastrofy	-
Xikui et al. (2016)	OST	3D geovizualizace v geologii	-
Buschmann et al. (2016)	PRA	animace leteckého provozu	3D linie
Ziolkowska et al. (2016)	PRA	geologická a hydrologická vizualizace	virtuální glóbus, 3D kartodiagramy
Robinson (2016)	PRA	geovizuální analytika	-
Juřík et al. (2016)	TEO	kognitivní aspekty 3D prostředí	-
Liu et al. (2017)	OST	vizuální analýza mořských dat	virtuální glóbus, 3D povrchy
Chen et al. (2017)	PRA	urbánní analytika	3D modely
Ortner et al. (2017)	PRA	urbánní plánování	-
Dübel a Schumann (2017)	PRA	prvky v 3D terénu	3D povrchy, 3D šipky, 3D linie
Bach et al. (2017)	TEO	vizualizace času	space-time cube
Richards-Rissetto (2017)	TEO	viditelnost	3D povrchy, 3D modely

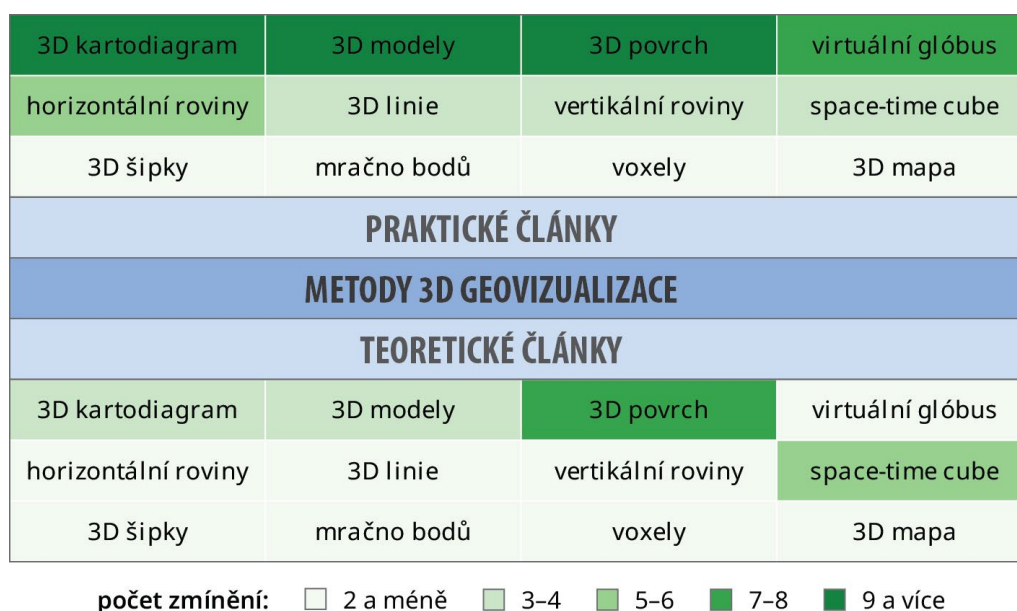
Jurík et al. (2017)	TEO	3D geovizualizace	-
Roth (2017)	TEO	grafické proměnné	-
Robinson (2017)	TEO	geovizuální analytika	-
Kubíček et al. (2017)	TEO	3D výškové profily	3D povrchy
Herman et al. (2017)	TEO	interaktivní 3D geovizualizace	3D povrchy, 3D kartodiagramy
Chen et al. (2018)	PRA	nadzemní a podzemní objekty	3D modely
Vollmer et al. (2018)	PRA	Level of Detail	3D modely
Krejčí (2018)	TEO	grafické proměnné	-
Herman et al. (2018)	TEO	uživatelská přívěťivost 3D map	-
Herman et al. (2018)	TEO	uživatelská přívěťivost 3D map	3D povrchy, 3D linie
Saeidi et al. (2019)	PRA	3D modelování měst	3D povrchy
Sathiyarayanan et al. (2019)	PRA	environmentální data	space-time cube
Herman (2019)	PRA	uživatelské aspekty 3D geovizualizace	3D povrchy, 3D linie, 3D modely
Lafrance et al. (2019)	PRA	participativní Web GIS	virtuální glóbus
Herman (2019)	PRA	uživatelská přívěťivost 3D map	3D kartodiagramy
Yang et al. (2019)	TEO	flow maps	3D linie
Faltejsková (2019)	TEO	3D v kartografii	-
Kilsedar a Brovelli (2020)	PRA	urbánní big data	3D kartodiagramy, horizontální roviny
Gautier et al. (2020)	PRA	teplota vzduchu a urbánní data	horizontální roviny, vertikální roviny, 3D kartodiagramy
Gautier et al. (2020)	PRA	klimatická a urbánní data	horizontální roviny, 3D kartodiagramy
Bruha a Kolár (2020)	TEO	3D povrchy	-
Chen et al. (2020)	TEO	3D budovy	3D modely

Jurik et al. (2020)	TEO	3D geovizualizace	3D povrchy
Lochhead a Hedley (2021)	OST	vizuální analytika	-
Evers et al. (2021)	OST	nejistota	-
Herman (2021)	PRA	uživatelské hodnocení 3D map	3D modely
Herman et al. (2021)	TEO	prostorové plánování a digi. dvojčata	3D povrchy
Rink et al. (2022)	OST	hydrometeorologické analýzy	3D linie, horizontální roviny, vertikální roviny
Chen et al. (2022)	OST	rekonstrukce krajiny	-
Deng et al. (2022)	OST	vizuální analýzy	-
Jiang et al. (2022)	OST	dostupnost	-
Christophe et al. (2022)	PRA	urbánní klima	horizontální roviny, mračno bodů, vertikální roviny, 3D kartodiagramy
Vuckovic et al. (2022)	PRA	vizuální analytika	virtuální glóby, 3D modely
Beran et al. (2022)	PRA	vizualizace hluku	3D povrchy, 3D kartodiagramy, vertikální roviny
Qiang et al. (2022)	TEO	prostorové vzory	-
Qiu et al. (2022)	TEO	analýza povodí	virtuální glóbus
Kraus et al. (2022)	TEO	3D geovizualizace	space-time cube
Vrbka (2022)	TEO	3D mapy	3D kartodiagramy
Huang et al. (2023)	OST	inženýrské sítě	3D linie, 3D modely
Mota et al. (2023)	PRA	urbánní analytika	3D modely
Wu et al. (2023)	PRA	viditelnost	3D modely
Lan a Delmelle (2023)	PRA	COVID-19	space-time cube

Meyer et al. (2023)	PRA	transport patogenů rostlin	virtuální glóby, 3D povrchy
Moreira et al. (2024)	PRA	urbánní analytika	-
Hilton et al. (2024)	TEO	asistovaná navigace	-
Li et al. (2024)	TEO	rozšířená vizualizace	3D modely

3.6 Souhrn a východiska pro disertační práci

Pomocí bibliografické analýzy metodou PRISMA byl proveden **systematický přehled literatury** relevantní pro disertační práci. Díky efektivnímu vyhledání vhodných zdrojů bylo možné **přesněji specifikovat název a zaměření práce** a **rozšířit rešerši a teoretický základ** v oblasti 3D geovizualizace a vizuální analýzy. Zároveň byly **identifikovány metody 3D geovizualizace** ve studiích, které prošly do fáze inclusion (obr. 8). Mezi nejpoužívanější metody v těchto studiích patří 3D kartodiagramy, 3D modely, 3D povrchy, virtuální glóby a horizontální roviny. Tyto poznatky budou implementovány v dalších fázích disertační práce, jako je například hodnocení metod 3D geovizualizace a návrh geovizualizačního prostředí pro vizuální analýzu ve 3D.



Obr. 8: Četnost použití metod 3D geovizualizace ve studiích, které prošly do fáze inclusion

4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Využitelnost **3D map** a **3D vizualizací** je stále častěji diskutována v souvislosti s rostoucím využíváním 3D technologií v mnoha oblastech, a možnosti využití 3D geoprostorových dat a 3D map jsou v dnešní době široké (Herman, 2018). Potřeba prezentovat **3D kartografický obsah** na počítačových monitorech roste a možnosti těchto prezentací se rozšiřují. Tyto vizualizace by však měly být srozumitelné i pro uživatele bez kartografického vzdělání (Popelka a Brychtova, 2013). **Vizualizace 3D geoprostorových informací** ale vyvolává otázku, jak tyto informace efektivně reprezentovat. Probíhající přechod od statických médií k různým interaktivním zobrazovacím technologiím má obrovský dopad na návrh, tvorbu a používání digitálních map a prostorových vizualizací. Aplikace stávajících osvědčených kartografických principů do moderních zobrazovacích technologií a vývoj nových kartografických metod jsou proto klíčovými výzvami pro současný i budoucí výzkum (Semmo et al., 2015).

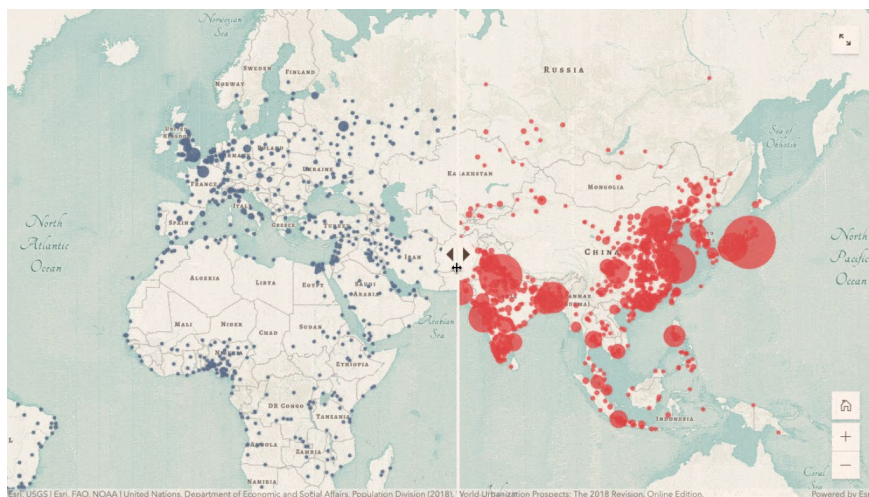
4.1 Vizuální analýza a vizuální analytika

Pro správné chápání podstaty disertační práce je klíčové vymezení pojmů **vizuální analýza (Visual Analysis)** a **vizuální analytika (Visual Analytics)**. Ačkoliv se tyto pojmy často zaměňují, v odborném kontextu geoinformatiky a kartografie mají odlišný význam. Hlavní rozdíl spočívá v roli počítače a míře interakce. Tato práce je zaměřena na vizuální analýzu.

Vizuální analýza (Visual Analysis)

Vizuální analýzu lze z pohledu kartografie chápat jako **rozbor obrazu kartografického díla** či kartografických děl **pouze na základě vizuálního vjemu informací v mapě**. Jedná se primárně o **kognitivní proces**, který se odehrává **v hlavě uživatele** při práci s mapou nebo vizualizací. Příkladem může být **vizuální porovnání dvou map** zobrazujících stejné území, ale v různém čase (obr. 9). Uživatel tedy může odvodit hodnoty jevu, prostorové vztahy, prostorové rozložení a další závěry pouze na základě **vlastního pozorování** bez nutnosti kvantifikace nebo statistického vyhodnocení. Počítač slouží pouze k tomu, aby data zobrazil, přičemž samotnou analytickou práci (vyvození závěrů) dělá člověk. Vizuální analýzu lze provádět i na analogové mapě, a není k ní tedy nutně potřeba interaktivní digitální vizualizační prostředí, na rozdíl od vizuální analytiky, kde je takové prostředí nezbytné.

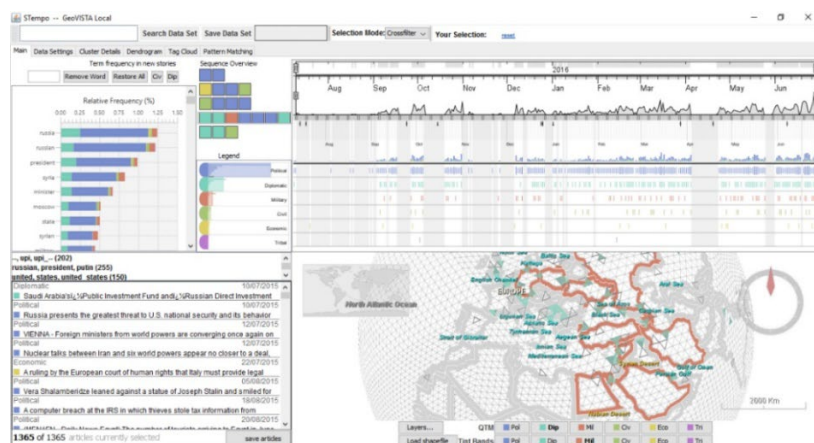
Vizuální analýzu v kontextu kartografie lze také označit jako **exploratorní kartografii**. Ta může být považována za kognitivní proces pro řešení geografických problémů, ve kterém se mapy používají jako nástroje pro průzkum s cílem získat vhled do neznámých geografických dat (Kraak, 1998). Vizuální analýzou, resp. analytikou v kartografii se podrobněji zabýval Koníček (2024). Podle něj je smyslem vizuální analýzy změnit pohled na zkoumaný dataset (analyzovaná data) pomocí **informační vizualizace**. Cílem je přinést relevantní a správné výsledky, které by bez zapojení vizualizační části nemusely být odhaleny. Při zkoumání dat pomocí vizualizace mohou vyvstat otázky, na které nejsou v současné vizualizaci k dispozici odpovědi. Proto je pro vizuální analýzu nezbytná možnost **zobrazit** ve vizualizaci **další proměnné** nebo **odstranit ty již nepotřebné**. Dalšími častými, důležitými a účinnými způsoby používanými při vizuální analýze jsou např. srovnávání, filtrování, agregace, zvýrazňování nebo přibližování a posouvání (Zákopčanová, 2018). Při navrhování interaktivních vizuálních analytických nástrojů je třeba zohlednit více faktorů s ohledem na jejich cílové uživatele, jako je zobrazení agregovaných dat v požadovaných geografických měřítkách, návrh vhodných vizualizací, logické uspořádání vizualizací a použití efektivních interakcí (Zuo et al., 2022).



Obr. 9: Ukázka swipe map jako typického nástroje pro vizuální analýzu – mapa znázorňuje městské obyvatelstvo v roce 1950 (vlevo – modrá) a v roce 2020 (vpravo – červená) (zdroj: Esri 2023b)

Vizuální analytika (Visual Analytics)

Pojem **(geo)vizuální analytika** poprvé definovali [Thomas a Cook \(2005\)](#) v knize *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. Jejich definice zní následovně: „**Vizuální analytika je věda o analytickém usuzování podporovaném interaktivními vizuálními rozhraními**“. Na [Thomase a Cooka](#) později navázali například [Andrienko et al. \(2007\)](#). Počítač na rozdíl od vizuální analýzy data nejen zobrazuje, ale **aktivně je zpracovává** (např. filtruje, počítá trendy) ještě před nebo během vizualizace. Příkladem vizuální analytiky mohou být různé **interaktivní dashboards** nebo **aplikace** (obr. 10). Vizuální analytika jako taková vznikla jako samostatná disciplína oddělená od oboru **informační vizualizace**, která se odlišuje svým zaměřením na vědu o analytickém uvažování s vizuálními rozhraními, nikoliv primárním důrazem na vizuální reprezentaci dat, jak je to běžné u informační vizualizace. Zjednodušeně řečeno, vizuální analytika klade důraz na podporu analytických procesů, nikoli pouze na vývoj nových vizuálních metod reprezentace dat ([Robinson, 2017](#)). V rámci **Mezinárodní kartografické asociace (ICA)** se vizuální analytice věnuje Komise pro geovizualizaci, kterou vede [Arzu Çoltekin](#), [Florian Ledermann](#) a [Anthony C. Robinson](#) ([ICA, 2026](#)).



Obr. 10: Ukázka nástroje STempo umožňujícího geovizuální analytiku – nástroj slouží k prohlížení a analýze vzorů v časoprostorových událostech shromážděných ze zpravodajských článků (zdroj: Robinson 2017)

Vizuální analytika přibližuje hranice mezi člověkem a strojem a hledá nejlepší nástroje pro **vizuální interakci**. Zároveň rozšiřuje koncept vizualizace: nejenže **poskytuje vizuální rozhraní k databázi**, ale také zprůhledňuje zpracování dat pro analytický diskurz. Geovizuální analytika založená na prostorových datech poskytuje rozhraní pro manipulaci s informacemi a jejich vizualizaci, nebo lépe řečeno pro výběr z předem připravených vizualizačních režimů. To má důsledky jak pro kartografa, tak pro uživatele (Ondrejka, 2021). Toto pojetí úzce souvisí s explorační analýzou dat a tradičními statistickými analytickými metodami, které jsou přirozenými při zkoumání dat klíčové. V průběhu explorační analýzy dat analytik vytváří pravděpodobné hypotézy, které může potvrdit nebo vyvrátit pomocí konfirmačních statistických metod (Andrienko et al., 2001). Podle Klippel et al. (2011) umožňuje vizuální analytika využití nejlepších lidských a počítačových schopností pomocí dynamických vizuálních rozhraní.

4.1.1 Vizualizační prostředí

Pojem **vizualizační prostředí (visualization environment)** není zatím v literatuře jasně vymezen. Jedním z příkladů použití tohoto slovního spojení je software **VERDI** (The Visualization Environment for Rich Data Interpretation). VERDI je nástroj vizuální analýzy pro vyhodnocování a vizualizaci výsledků z meteorologických dat a modelů kvality ovzduší vyvinutý Agenturou pro ochranu životního prostředí USA (US EPA, 2015). Pojem „vizualizační prostředí“ se objevuje také v článku Heitzlera et al. (2017), který představuje simulační a vizualizační prostředí pro podporu provádění časoprostorových hodnocení rizik na základě simulačních modelů a vizuální analýzy výsledků simulace. Obecně by se vizualizační prostředí dalo popsat jako „programové prostředí umožňující interaktivní vizuální analýzu dat uživatelem“. Uživatel tedy může data libovolně filtrovat, měnit způsoby vizualizace a na základě vizuálního porovnání vyvozovat závěry.

4.2 Percepce 3D prostoru

Pro optimální tvorbu 3D vizualizací je třeba si uvědomit **psychologické faktory**, které na uživatele při vnímání 3D prostoru působí. Jak uvádí Plháková (2021), vizuální podněty z trojrozměrného světa dopadají na dvojrozměrný povrch sítnice, odkud jsou v podobě nervových impulsů odeslány do mozku. Ve skutečnosti není důležité, že sítnice má pouze dva rozměry, protože mozek tak jako tak zpracovává pouze nervové impulsy. Ty však obsahují informace, které po dešifrování umožňují **vnímání vzdálenosti**, tedy **třetího rozměru**. Vnímání 3D prostoru je umožněno za pomoci mechanismů známých jako **vodítka hloubky** (Sternberg, 2011). Lidský zrakový systém interpretuje hloubku vnímaných obrazů pomocí fyziologických i psychologických signálů. Některé fyziologické signály vyžadují, aby byly použity obě oči (binokulární), jiné jsou dostupné i při pohledu na obraz pouze jedním otevřeným okem (monokulární). Všechny psychologické signály jsou monokulární. V reálném světě lidský zrakový systém automaticky využívá všechny dostupné hloubkové signály k určení vzdálenosti mezi objekty (Okoshi, 1976). V tabulce 3 jsou znázorněna konkrétní vodítka hloubky pro monokulární a binokulární vidění.

Tab. 3: Monokulární a binokulární vodítka pro vnímání hloubky (převzato z Sternberg 2011 in Faltejsová 2019)

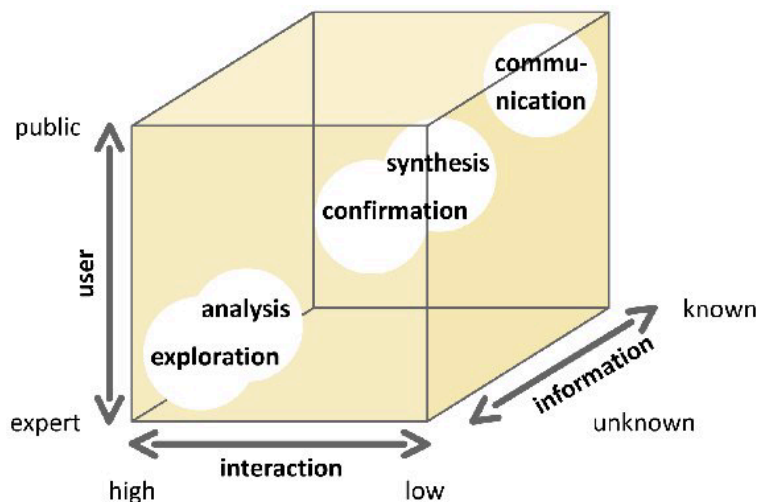
vodítka hloubky	název	popis
monokulární	gradienty textury	zrnitost povrchu
	relativní velikost	větší/menší objekty
	interpozice	částečný překryv objektů
	lineární perspektiva	sbíhání/rozbíhání linií k horizontu
	atmosférická perspektiva	zřetelnost obrysů objektů
	umístění v rovině obrazu	objekty níže/výše vzhledem k horizontu
	pohybová paralaxa	rychlost pohybu vzdálených/blízkých objektů
binokulární	binokulární konvergence	signály z pohybu bulvy
	binokulární disparita	složení rozdílných obrazů z každého oka

Podle Buchroithnera a Knusta (2013) existují dva typy 3D vizualizace: **pseudo-3D a real-3D**. Pseudo-3D vizualizace se zobrazuje pouze pomocí **monokulárních hloubkových signálů** na rovinném médiu, zpravidla na **obrazovce počítače**. Real-3D (true-3D) se týká **stereoskopických vizualizací**, které používají jak binokulární, tak monokulární hloubkové signály. Kraak a Ormeling (2020) rozlišují 2,5D a 3D zobrazení. V případě 2,5D zobrazení je třetí dimenze (výška) pouze atributem připojeným k souřadnicím x a y, což znamená, že pro každou polohu existuje pouze jedna hodnota výšky. Naproti tomu skutečné 3D modely umožňují definovat objekty, kde pro jednu souřadnici x, y existuje více hodnot z (např. převisy, tunely nebo složité budovy). Trojrozměrnost při 3D modelování, např. pomocí 3D modelovacího programu, neznamena, že je tato scéna určena i pro skutečně prostorové, tj. stereoskopické vnímání. Při pohledu na běžný monitor by taková scéna založená na trojrozměrných datech byla vnímána „ploše“. Existují také různé druhy trojrozměrnosti, z čehož vyplývá, že druh vnímání 3D modelu závisí na technice použité pro vizualizaci (Knust a Buchroithner, 2014).

4.3 Geovizualizace a 3D geovizualizace

Geografická vizualizace (často zkracovaná jako **geovizualizace** a hovorově používaná jako **geovis**) se zrodila s přechodem kartografie do digitální éry. Geovizualizace byla různými vědci a výbory definována s důrazem na zkoumání (a tedy i analytické vyvozování závěrů) umožněné interaktivitou, jakožto charakteristickým rysem, který by ji odlišoval od tradiční kartografie (Çöltekin et al., 2017). GIS&T Body of Knowledge definuje **geovizualizaci** primárně jako **proces interaktivní vizualizace geografických informací v některém z kroků prostorových analýz**, i když se může vztahovat i na vizuální výstupy (např. grafy, mapy, jejich kombinace) nebo související techniky. Geovizualizace, která má kořeny v kartografii, se objevila jako výzkumný směr pod vedením **Alana MacEachrena**. Hlavním argumentem pro geovizualizaci je, že vizuální myšlení s využitím map je nedílnou součástí vědeckého procesu a vytváření hypotéz a role map se rozrostla nad rámec sdělování konečných výsledků procesu analýzy nebo dokumentace. Geovizualizace je propojena s řadou disciplín včetně kartografie, vizuální analýzy, informační vizualizace, vědecké vizualizace, statistiky, informatiky, umění a designu a kognitivní vědy (Çöltekin et al., 2018).

Geovizualizace integruje různé přístupy z těchto oborů, aby poskytla teorii, metody a nástroje pro vizuální průzkum, analýzu, syntézu a prezentaci geoprostorových dat (MacEachren a Kraak, 2001). Tyto různé účely geovizualizace jsou znázorněny prostřednictvím **geovizualizační kostky** (geovisualization cube – obr. 11). Tu definovali MacEachren a Kraak již v roce 1997. Na třech osách jsou znázorněny tři kontinuální charakteristiky – **uživatel** (veřejnost × odborníci), **interakce** (vysoká × nízká) a **informační obsah** (neznámý × známý). Osy slouží k rozlišení mezi různými účely geovizualizace od průzkumu spíše neznámého souboru dat po sdělení známých informací. Například průzkumná geovizualizace je obvykle vysoce interaktivní a umožňuje odbornému uživateli odhalit dříve neznámé informace nebo vzory v souboru dat. U 3D geovizualizací lze vycházet z definice kostky, ale je nutné být konkrétnější, zejména pokud jde o aspekt interakce, který často zahrnuje aspekty navigace. Zatímco geovizualizační kostka předpokládá vysokou míru interakce především pro průzkumné účely expertních uživatelů, v některých 3D geovizualizacích (např. virtuálních glóbech) potřebuje interakci nebo navigaci i laický uživatel, a to i bez cíle prozkoumat neznámý soubor dat (MacEachren a Kraak, 1997; Bleisch, 2012). Hlavním výstupem této práce by mělo být 3D geovizualizační prostředí. To by mělo být z hlediska geovizualizační kostky zaměřeno spíše na **odborníky**, umožňovat **vysokou interaktivitu** a sloužit k **exploraci** jak známých, tak neznámých dat.



Obr. 11: Účely geovizualizace od průzkumu po komunikaci znázorněné pomocí geovizualizační kostky (zdroj: MacEachren a Kraak 2001; Bleisch 2012)

4.3.1 3D geovizualizace

3D data umožňují přesnější a realističtější vizualizaci geografických objektů a jevů. Podle Bleisch (2012) je **3D geovizualizace** poměrně obecný termín, který se používá pro řadu 3D vizualizací, které představují reálný svět, jeho části nebo jiná data s prostorovým odkazem. Mnoho 3D geovizualizací se zaměřuje na **znázornění krajiny reálného světa** a často také reálných objektů, jako jsou například **budovy**. Typickými příklady jsou digitální výškové modely doplněné ortofotomapou nebo satelitními snímky a více či méně podrobné 3D modely měst. Podle Voženíka (2005) trojrozměrné vizualizace efektivně prezentují velké množství komplexních informací širokému spektru uživatelů, díky čemuž jsou vhodné i pro uživatele, kteří mají malé nebo žádné zkušenosti s mapováním nebo GIS. 3D geovizualizace má oproti tradičním 2D vizualizačním metodám **mnoho výhod**. Za prvé 3D geovizualizace poskytuje **dynamické a interaktivní prostředí**, které je mnohem flexibilnější než konvenční způsob analýzy dat. Výzkumník může **přímo manipulovat** s atributy scény a jejími prvky, **měnit pohledy a parametry**, dotazovat se na

data a snadno si prohlížet výsledky všech těchto činností. Zadruhé, na rozdíl od kvantitativních metod, které mají tendenci v procesu analýzy snižovat dimenzionalitu dat, může 3D geovizualizace **zachovat složitost původních dat** v míře, kterou je lidské vizuální zpracování ještě schopno zvládnout. Díky mnoha užitečným funkcím 3D geovizualizace, jako je průlet, zvětšování, posouvání a dynamické otáčení, a také díky multimediálním možnostem generování sérií mapových animací, jako jsou 3D „procházky“ a „průlety“, může výzkumník vytvořit „virtuální svět“, který reprezentuje městské prostředí s velmi vysokou mírou realismu (Batty et al., 1998; Kwan a Lee, 2003). 3D geovizualizace umožňují uživatelům **snáze porozumět geografickým vztahům** a jsou často **atraktivnější** než klasické 2D mapy. Tyto vizualizace mohou být navíc obohaceny například o budovy nebo terén. 3D geovizualizace má velké uplatnění například v urbanismu nebo v územním plánování (Bittner, 2022; Plačková, 2022; Kapounková, 2018; Herbert a Chen, 2015) jelikož umožňuje vytvořit realistické a poutavé urbanistické projekty vedoucí k efektivnějšímu plánování, komunikaci a rozhodování.

Jednou z nejeфекtivnějších technik 3D geovizualizace, která přispívá k pochopení časoprostorových dat lidského chování, je **časoprostorová kostka (Space-Time Cube)**. V základním provedení Kraaka (2003) má kostka na své základně znázorněnou **zeměpisnou polohu** (podél os X a Y), zatímco výška kostky představuje **čas** (osa Z). Typická časoprostorová kostka může obsahovat časoprostorové dráhy například jednotlivců nebo autobusových linek. 3D geovizualizace sice pomáhá pochopit objemy a morfologii tím, že se přibližuje vnímání reálného světa, ale může také trpět problémy s viditelností, které neusnadňují procesy vnímání a poznávání (Devaux et al., 2018). Pod 3D geovizualizaci lze zařadit např. 3D mapy nebo virtuální glóby.

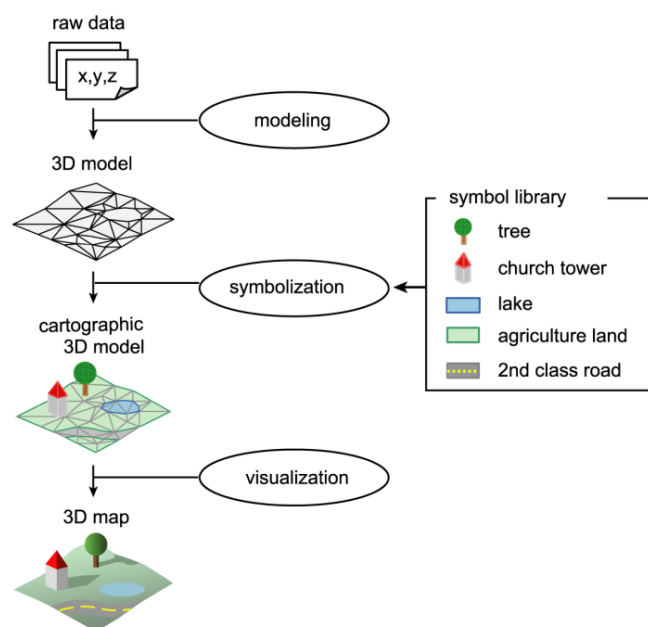
4.3.2 3D mapy

V posledních dvou desetiletích se v odborných článcích začíná objevovat termín **3D mapa**. Jednotná definice tohoto termínu zatím neexistuje. Bandrova (2005) definuje 3D mapu jako počítačově generované, matematicky definované, trojrozměrné, vysoce realistické virtuální zobrazení povrchu světa (nebo jiného nebeského tělesa), stejně jako objektů a jevů v přírodě a společnosti. Zobrazované objekty a jevy jsou klasifikovány, navrženy a vizualizovány podle konkrétních účelů. Toto vymezení již současnému vývoji kartografie neodpovídá. Häberling et al. (2008) ji popisují jako generalizovanou reprezentaci určité oblasti pomocí symboliky pro znázornění fyzických vlastností. Schobesberger a Patterson (2008) charakterizují 3D mapu jako zobrazení terénu s falešnou trojrozměrností, obsahující perspektivu, která zmenšuje měřítko vzdálených oblastí. Hájek et al. (2016) pod pojmem 3D mapa rozumí mapu obsahující digitální model terénu (DMT), 2D data zakreslená v terénu, 3D modely objektů ve správných měřítkách a 3D symboly vyjadřující objekty, které nelze modelovat v jejich skutečných proporcích. Jak uvádí Bandrova (2022), obsah 3D map lze rozdělit do tří témat:

- **hlavní obsah** – velké topografické nebo krajinné objekty, jako jsou např. reliéfní tělesa, cesty nebo budovy,
- **sekundární obsah**, nesoucí základní informace. Například ve 3D mapách měst - „malé“ objekty, reprezentované symboly: dopravní značky, objekty, dopravní prvky, informační cedule, stromy apod.,
- **doplňkový obsah**, poskytující kvalitativní a kvantitativní informace o objektech, často vytvořený jako textová databáze, týkající se každého z navržených objektů nebo mapy jako celku.

Schmidt a Delazari (2010) se zabývali návrhem metodiky **kvalitativního testování 3D map** a uvádějí, že použití kartografických vizualizací ve 3D scénách kombinuje **technologické výhody** pro zpracování a ukládání prostorových dat. Kartografické znalosti potřebné k vytvoření těchto vizualizací však nenásledovaly technologický vývoj. V důsledku toho neexistují obecné zásady pro tvorbu 3D map. Běžnou úlohou využití 3D map je **virtuální navigace**, kterou lze definovat jako proces, při němž osoba určuje svou polohu vzhledem k ostatním prvkům krajiny a využívá těchto znalostí k orientaci. Určení relativní orientace však není ve virtuálním prostředí triviální úlohou. 3D tematické mapy se musí vypořádat s **různými problémy**, např. s **okluzí scény** v důsledku velkého množství dat nebo s výrazně **odlišnými měřítky mapy** v popředí a pozadí scény (Beran et al., 2022).

Možnostmi aplikace vybraných kartografických principů do prostředí virtuálních 3D map se ve své disertační práci zabýval Hájek (2018), přičemž se zaměřil zejména na specifika 3D map urbanizovaného území. Na obrázku 12 je znázorněno **schéma procesu tvorby 3D map**. Prvním krokem procesu je **modelování dat**, kdy jsou původní data analyzována a zpracována. Geometrické a sémantické aspekty objektů v datech jsou přetvořeny, agregovány a/nebo klasifikovány do formátu požadovaného specifickým programem používaným pro návrh a tvorbu 3D map a vzniká 3D model. V rámci **symbolizace** je určen grafický vzhled digitálního modelu terénu i topografických a tematických objektů. Posledním krokem je **vizualizace**, kdy jsou zvoleny parametry pro vytvoření obrazu a doplnění scény, která se stane finální 3D mapou (Häberling, 2002).



Obr. 12: Schéma procesu tvorby 3D map (zdroj: Terribilini 2001 in Häberling 2002)

Pro řešení technických aspektů návrhu 3D map jsou zapotřebí **specifická vstupní data a software**. Vstupní data sestávají z **GIS vrstev a digitálních modelů terénu** pokrývajících rozsáhlé oblasti světa. Pro většinu zemí jsou k dispozici digitální modely terénu s různým rozlišením a stupněm generalizace. Jako texture pro 3D mapy lze použít rastrová data, jako jsou ortofotomapy, satelitní snímky nebo naskenované topografické a tematické mapy. Zobrazený obsah 3D mapy může být založen na **rastrových** nebo **vektorových datech**, přičemž vektorová data nabízejí větší flexibilitu a umožňují interaktivnější přístup (Häberling et al., 2008). 3D mapy mají své výhody i nevýhody. Některé z nich zmiňují Schobesberger a Petterson (2008) ve svém článku o efektivnosti 2D a 3D map pro turisty v národním parku Zion v Utahu.

Výhody:

- pro uživatele jsou 3D mapy často více poutavé,
- pozice virtuální kamery a směr pohledu je přizpůsobitelný,
- je snadné vizualizovat a rozumět rozdílům v nadmořské výšce a topografickým prvkům,
- je možné překrýt tematické a fotorealistické informace,

Nevýhody:

- v rámci scény je odlišné měřítko pro přední a zadní část vizualizace,
- vysoké topografické objekty mohou zakrýt důležité informace v pozadí,
- produkce 3D map vyžaduje více času a je dražší než produkce 2D map,
- je zapotřebí kvalitního digitálního výškového modelu, který není vždy dostupný,
- k vytvoření 3D map je zapotřebí speciálního softwaru,
- techniky pro tvorbu 3D map nejsou pro kartografy moc známé (Schobesberger a Patterson, 2008; Faltejsková, 2019).

4.3.3 3D modely měst

Součástí výsledného vizualizačního prostředí by měla být možnost zobrazit 3D modely měst, resp. budov. Podle Khayyal et al. (2022) jsou minimálním požadavkem pro vytvoření 3D modelu města data o terénu a 2D prostorové prvky, jako jsou budovy, krajina nebo uliční síť. Kromě toho je **důležitým atributem v procesu tvorby 3D budov informace o jejich výšce**. Hlavním problémem během procesu tvorby je **nedostatek** přesných volně dostupných **datových sad** a **časově náročné úpravy**. Aplikací 3D modelů měst neustále přibývá díky výraznému zdokonalení technologií sběru dat, jako jsou letecké snímky, bezpilotní letouny a lidarová data. Mezitím došlo k **rozmachu počítačové grafiky**, která dokonale a s vysokou přesností generuje každý prvek 3D modelu. V poslední době se stalo nezbytným vytvořit v krátkém čase velké množství přesných 3D modelů měst, přičemž 3D model města hraje klíčovou roli při **přechodu z tradičního města na smart city** (Alastal et al., 2019). Díky rychlému rozvoji výpočetních kapacit, počítačové grafiky, webových technologií a geoprostorových technologií je možné vytvářet detailní 3D modely měst, ke kterým mohou mít současně přístup tisíce lidí z celého světa. **Prostorová reprezentace a generalizace** 3D modelů jsou klíčem k **efektivní vizualizaci 3D modelů měst** ve více měřítkách (Mao, 2010). Manuální geometrické modelování může být použito v modelech malých měřítek, ale pro model rozsáhlých území je potřeba použít automatické nebo poloautomatické pořizovací metody (Dědková, 2012).

Z 3D modelů měst v českém prostředí patří mezi nejpokročilejší **3D modely Prahy a Brna**. Oba modely poskytují základní funkce, jako je přepínání vrstev, měření, analýza viditelnosti nebo změna denní doby. 3D model Prahy navíc umožňuje zobrazovat inženýrské sítě a **tematické informace o budovách**, jako je např. počet podlaží, typ budovy nebo vlastnictví budovy (obr. 13). Přidanou hodnotou 3D modelu Prahy je také realistická vizualizace vodní hladiny (IPR Praha, 2023; KAM Brno, 2023). V rámci projektu „Olomouc ve 3D – nová dimenze kulturního dědictví města: minulost, přítomnost, budoucnost“ by měl do roku 2027 vzniknout také 3D model Olomouce (Univerzita Palackého v Olomouci, 2023). Ze zahraničních aplikací stojí za zmínku 3D modely Amsterdamu a Vídně (Gemeente Amsterdam, 2023; Stadt Wien, 2023).



Obr. 13: 3D model Prahy v LOD2 – barva budov reprezentuje počet podlaží (zdroj: IPR Praha 2023)

4.3.4 Virtuální glóby

Jedním z nejatraktivnějších vývojových počínů poslední doby v oblasti GIS byl **nástup virtuálních glóbů**, tedy 3D webových služeb hostovaných v prostředí webových GIS, které zveřejňují **globální 3D databáze** a související služby pro **použití přes web**. Virtuální glóby umožňují uživatelům vizualizovat geografické informace na 3D globálních podkladových mapách (Longley et al., 2010). Virtuální glóby, resp. rozhraní a značkovací jazyky, které podporují, nabízejí řadu možností pro reprezentaci různých datových sad v geografickém kontextu. Pokud se datové soubory vztahují ke krajině, ve které byly shromážděny (např. data ze sítě senzorů sbírajících data v horském prostředí), může vizualizace takových datových souborů v rámci virtuálního ekvivalentu přírodního prostředí pomoci při jejich analýze ve vztahu k nadmořské výšce a tvaru terénu (Bleisch, 2011). Níže jsou stručně popsána čtyři vybraná řešení umožňující vizualizaci 3D dat ve formě virtuálních glóbů. Ty mohou sloužit jako inspirace pro praktickou část práce.

Google Earth

Google Earth je webová aplikace, resp. počítačový program, která vykresluje 3D zobrazení Země pomocí překrývání satelitních snímků, leteckých fotografií a GIS dat na 3D glóbus a umožňuje uživatelům vidět města a krajinu z různých úhlů. Uživatelé mohou glóbus prozkoumávat zadáváním adres a souřadnic nebo pomocí klávesnice či myši. Zároveň mohou uživatelé do programu přidávat vlastní údaje pomocí jazyka **Keyhole Markup Language (KML)**. Google Earth byl vytvořen firmou Keyhole, Inc. a v roce 2004 zakoupen společností Google (Google, 2023). Google Earth (a jiné srovnatelné projekty), se snaží dosáhnout rozšíření tematických map a jejich prostřednictvím také geografických informací mezi širokou veřejnost. Právě **širší geografické povědomí** vytvořené na základě **zjednodušeného modelu reality** představovaného tematickou mapou může být jedním z prostředků, které umožňují orientaci v dnešním multikulturním globalizovaném světě, kde stále důležitější roli hrají informace a znalosti, jejich sdílení, reprezentace a šíření (Čerba, 2009).

ArcGIS Earth

ArcGIS Earth je interaktivní 3D aplikace pro vizualizaci a vyhodnocování událostí na Zemi. Dokáže pracovat s daty v různých formátech, a to například s 3D modely, soubory KML, KMZ nebo TXT, se službami ArcGIS a dalšími webovými službami, které se připojí **prostřednictvím URL**. ArcGIS Earth je bezplatný a jednoduchý nástroj pro rychlou práci s 3D daty, který je možné využívat jak na stolních počítačích, tak i na mobilních zařízeních (ARCDATA Praha, 2023).

NASA WorldWind

NASA WorldWind je **open source 3D engine** pro tvorbu virtuálních glóbů. WorldWind umožňuje vývojářům aplikací rychle a snadno vytvářet interaktivní vizualizace geografických informací ve 3D planetárním kontextu. Organizace po celém světě používají WorldWind ke sledování vývoje počasí, vizualizaci měst a terénu, sledování pohybu vozidel, analýze geoprostorových dat a vzdělávání lidstva o Zemi. Na rozdíl od Google Earth nebo ArcGIS Earth se nejedná přímo o aplikaci, ale spíše o **SDK (Software Development Kit)**, pomocí kterého mohou vývojáři vytvářet vlastní aplikace (NASA, 2023).

Cesium

Cesium je základní otevřená platforma pro vytváření výkonných 3D geoprostorových aplikací. Základem platformy je **Cesium ion**, který umožňuje ukládat bodová mračna, 3D modely budov a další prostorová 3D data do prostředí cloudu. **CesiumJS** je multiplatformní JavaScriptová knihovna pro vytváření 3D glóbů a 2D map ve webovém prohlížeči bez zásuvného modulu. CesiumJS je uzpůsobený pro vizualizaci dynamických dat a využívá WebGL pro hardwarově akcelerovanou grafiku. Výhodou Cesium je možnost přímého propojení se systémy **Unity**, **NVIDIA Omniverse** nebo **Unreal Engine** (Cesium GS, 2023b).

4.3.5 Virtuální realita

Virtuální realita (VR) je definována jako **trojrozměrné syntetické digitální prostředí**, které uživateli umožňuje několik stupňů volnosti interagovat s prostředím a zapojovat se do imerzivních interakcí v tomto prostředí (Lamb, 2023). Virtuální realita v posledních patnácti letech vykonala velký rozvoj. Od neskladných zařízení se dostala do domácností a pořídit si dnes zařízení pracující s VR může skoro každý. Existuje také velké množství **panoramatických mapových aplikací** (tzv. street view), které umožňují procházet aplikací pomocí VR brýlí. V neposlední řadě existuje velké množství programů, který se zaměřuje na práci s panoramatickými fotografiemi a vytváří z nich virtuální prohlídky (Maceček, 2018).

V systémech VR je uživatel reprezentován **avatarem**. V mnoha aplikacích je avatar zjednodušen na **virtuální kameru**. Kameru lze také definovat jako soubor informací vztahujících se k určitému pohledu (nejčastěji jeho poloze a orientaci nebo zornému poli). Uživatel vidí **virtuální zobrazení** ve **virtuálním prostředí** prostřednictvím **zobrazovacího zařízení** (např. obrazovka počítače). Základem tvorby VR je vytváření 3D objektů a scén, manipulace a pohyb v těchto scénách, detekce kolizí a zobrazování v reálném čase. Tyto metody jsou rozšířeny o použití speciálních metod a zařízení, jako je stereoskopická projekce nebo snímáče polohy v prostoru. Potenciálně může VR obsahovat více informací než realita, ale vytváří spíše realistický než autentický pohled (Herman, 2018). LaValle (2023) nicméně uvádí, že naše těla **nebyla navržena pro virtuální realitu** a použitím umělé stimulace našich smyslů je narušováno fungování biologických mechanismů vyvinutých za stovky milionů let. Virtuální realita je vstupem, na který lidské tělo není zvyklé.

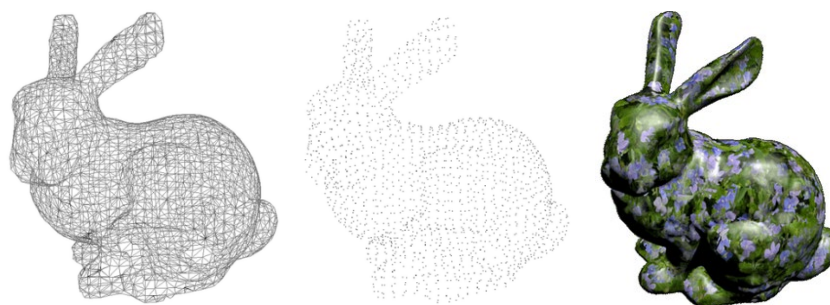
Kromě virtuální reality existuje ještě **rozšířená realita (Augmented Reality, AR)**, která kombinuje reálný svět s počítačově generovanými prvky, které uživatel vidí **skrze zařízení** (telefon, tablet, brýle). Rozšířenou realitu lze využít například pro vizualizaci změn krajinného pokryvu. Rozšířená realita je nástroj, který sice v kartografii a GIS stále představuje spíše okrajovou techniku, ale nabízí **inovativní perspektivu** pro vnímání prostorových změn (Mužík, 2025).

4.4 3D data

3D data se rozumí data, jejichž geometrie je reprezentována **v trojrozměrném prostoru**. 3D data tedy obsahují tři dimenze – délku, šířku a hloubku. 3D data mohou mít mnoho podob, jako jsou např. bodová mračka, voxely nebo 3D povrchy. **Bodové mračko** je diskrétní množina datových bodů v 3D prostoru. **Voxely** jsou 3D analogií pixelů, přičemž každý voxel reprezentuje objem v 3D prostoru. **3D povrchy** vznikají zpravidla interpolací bodů z bodového mračka. Trojrozměrná data lze reprezentovat **mnoha způsoby** od jednoduchých extrudovaných polygonů až po trojúhelníkové sítě, ale **neexistuje jediná datová struktura, která by nejlépe vyhovovala všem účelům a aplikacím** (Arroyo Ohori et al., 2015).

McHenry a Bajcsy (2008) tvrdí, že existuje celá řada problémů souvisejících se získáváním, reprezentací, ukládáním, vyhledáváním, porovnáváním a vykreslováním 3D dat, protože **chybí standardní definice** obsahu 3D dat, datových struktur v paměti a formátů souborů na disku, stejně jako implementace vykreslování. Prvky 3D modelů rozdělují do tří hlavních kategorií:

- **geometrie** – uložena jako sada 3D bodů (nebo vrcholů), povrch modelu je pak uložen jako řada polygonů (nebo ploch), které jsou vytvořeny indexováním těchto vrcholů,
- **vzhled** – obohacení povrchu modelu o barvy, textury nebo obrázky (obr. 14),
- **scéna** – kompozice modelu vzhledem ke kameře, zdroji světla nebo dalším 3D modelům.



Obr. 14: The Stanford Bunny v podobě drátěného modelu – wireframu (vlevo), v podobě bodového mračka (uprostřed) a s aplikací textury (vpravo) (zdroj: Archaeology Data Service 2023)

4.4.1 Prostorová 3D data

V rámci GIS se propojují atributové informace s prostorovou složkou. Pro vyjádření prostorové složky lze využít také 3D modely. Těm je možné podobně jako například vektorovým objektům přiřadit atributy a vytvářet z nich vrstvy (Meyer, 2017). Trojrozměrná (3D) prostorová data jsou **trojrozměrnou matematickou reprezentací přírodních a lidských objektů reálného světa** na mapě, obrázku nebo scéně **s výškovými hodnotami (z-hodnotami)** uloženými společně s geometrickými informacemi (Apeh a Abdul Rahman, 2023). Z-hodnoty umožňují ukládat a zobrazovat více informací než tradiční 2D prostorová data (pouze hodnoty x a y). Přestože z-hodnoty jsou **nejčastěji reálné hodnoty nadmořské výšky** (např. výška nad hladinou moře nebo geologická hloubka) **neexistuje žádné pravidlo, které by tuto metodiku vynucovalo**. Z-hodnoty lze použít k vyjádření mnoha jevů, jako je např.

koncentrace chemických látek nebo vhodnost lokality (Esri, 2021). Vzhledem k existenci souřadnice Z (výška), objemu i tvaru, lze tyto 3D objekty využívat pro specifické analýzy. Tyto analýzy pak mohou dosahovat kvalitnějších a přesnějších výsledků než při použití 2D vektorové reprezentace objektů. Mezi takové lze zahrnout např. analýzu viditelnosti, proudění vzduchu či vržení stínu v danou denní i roční dobu (Meyer, 2017).

Jak uvádí Azri et al. (2015), očekává se, že v příštích několika letech se 3D data stanou nedílnou součástí geoprostorových dat. Problematika správy 3D prostorových dat je však stále ve fázi výzkumu, přičemž jedním z problémů je zhoršení výkonu při načítání 3D dat. Proces sběru prostorových 3D dat lze nazvat jako **3D mapování**. To je podle terminologického slovníku ČÚZK definováno jako *proces sběru prostorových informací, při kterém místa a eventuálně i atributy objektů jsou prezentovány pomocí tří rozměrů (např. zeměpisnou šířkou, zeměpisnou délkou a nadmořskou výškou) a které mohou být interpretovány uživatelem* (ČÚZK, 2020a).

4.4.2 Zdroje prostorových výškových 3D dat

Digitální model terénu (DMT, anglicky **digital elevation model** – DEM) je zastřešující pojem pro **digitální model reliéfu** (DMR, anglicky **digital terrain model** – DTM, povrch georeliéfu bez přírodního nebo antropogenního pokryvu) a **digitální model povrchu** (DMP, anglicky **digital surface model** – DSM, povrch georeliéfu s přírodními i antropogenními prvky) (Hirt, 2016). Díky modernímu technologickému vývoji lze DMT vytvořit pomocí **fotogrammetrie** (leteckých a satelitních snímků), **pozemního či leteckého laserového skenování (LiDAR)** a **pozemních geodetických měření**. Kvalita dat shromážděných pro vytvoření DMT, a především kvalita získání výšky bodů závisí na použité technologii. DMT je číselná reprezentace, v níž se topografický povrch celého terénu nebo jeho části snažíme znázornit jako matematickou plochu s určitým počtem bodů. Model se skládá z buněk sítě, z nichž každá má hodnotu výšky a je od sebe stejně vzdálena (Germak et al., 2021). Názory na volbu vhodné metody pro sběr výškopisných dat se liší v závislosti na účelu. Například článek od Caldeira et al. (2023) srovnává tvorbu digitálních modelů terénu vytvořených pomocí radaru a LiDARu v zalesněných oblastech, přičemž jako nejvhodnější techniku pro získání DMT uvádí **letecký LiDAR**, který má však časová a finanční omezení pro velké plochy. Na druhé straně například Jiménez-Jiménez et al. (2021) uvádí jako atraktivní metodou pro tvorbu DMT **fotogrammetrii pomocí bezpilotních letounů (UAV)**, a to zejména díky méně přísným požadavkům na geometrii pořizování snímků a vysoké míře automatizace geometrického řešení a kalibrace kamery. Fotogrammetrie pomocí UAV umožňuje získat DMT s vysokou přesností a prostorovým rozlišením při nízkých nákladech. Pro globální digitální modely terénu se však téměř výhradně využívá radarová fotogrammetrie nebo laserové skenování.

Li et al. (2017) se zabývali porovnáváním pěti volně dostupných digitálních modelů terénu, a to konkrétně ASTER GDEM2, SRTM, GMTED2010, EarthEnv-DEM9 a GTOPO30. Níže jsou uvedeny základní charakteristiky vybraných datových sad:

- **SRTM** pokrývá zemský povrch mezi 60° s. š. a 56° j. š., prostorové rozlišení je 1 úhlová vteřina (cca 30 m) a vertikální přesnost při rozlišení 90 m je 16 m. Výškové údaje SRTM se měří pomocí radarové interferometrie s využitím senzorů Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) v pásmu X a C na palubě kosmické lodi Shuttle Radar Topography Mission. Data byla shromážděna během jedenáctidenní mise v únoru 2000 (USGS, 2023).
- **GMTED2010** (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) je nástupcem modelu GTOPO30. Je založen na datech odvozených z 11 výškových zdrojů a byl vytvořen ve třech

samostatných rozlišení: 7,5 úhlových vteřin (cca 250 m), 15 úhlových vteřin (cca 500 m) a 30 úhlových vteřin (cca 1 km). GMTED2010 byl vytvořen sedmi metodami agregace, jako např. minimální nadmořská výška, maximální nadmořská výška nebo směrodatná odchylka. GMTED2010 poskytuje globální pokrytí všech pevninských oblastí od 84° s. š. do 56° j. š. pro většinu produktů, a pro vybrané produkty pokrytí od 84° s. š. do 90° j. š. (USGS, 2018).

- **EarthEnv-DEM90** je datová sada, která vznikla kompilací dat ASTER GDEM2 a SRTM. Byla sestavena pomocí metod pro plynulé slučování vstupních datových sad, důkladné vyplňování mezer a vyhlazování nepravidelností dat. Výsledný produkt má rozlišení 3 úhlové vteřiny (cca 90 m) a pokrývá přibližně 91 % zemského povrchu (Robinson et al., 2014).
- **EU-DEM** je digitální model povrchu na celoevropské úrovni. Jedná se o hybridní produkt založený na datech SRTM a ASTER GDEM sloučených metodou váženého průměrování. EU-DEM je součástí služby Evropské unie Copernicus Land Monitoring Service a má rozlišení 25 m (EEA, 2023).
- **Copernicus DEM** je digitální model povrchu, který je poskytován ve třech úrovních rozlišení (90 m, 30 m a 10 m) a dvou úrovních prostorového rozsahu (evropský a globální). Vstupní data byla získána v rámci mise TanDEM-X mezi lety 2011 a 2015, přičemž Copernicus DEM je dále udržován a aktualizován (CDSE, 2025).

Z komerčních datových sad pro globální digitální modely terénu lze zmínit např. **WorldDEM**. WorldDEM je produkt mise TanDEM-X za použití technologie SAR (Synthetic Aperture Radar), má prostorové rozlišení 5 m a vertikální přesnost 2 m. WorldDEM je odvozen z produktu WorldDEM Digital Surface Model (DSM) odstraněním vegetace a objektů vytvořených člověkem, aby byl zobrazen holý terén zemského povrchu (UN, 2023).

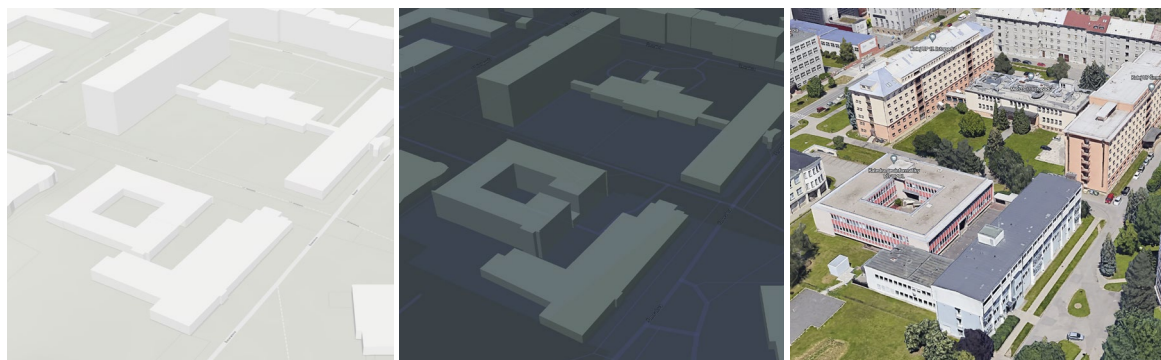
Z digitálních modelů terénu pro území Česka je nezbytné zmínit **Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G)** a **Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G)**. DMR 5G představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013. Dokončen byl k 30. 6. 2016 na celém území ČR (ČÚZK, 2023c). DMP 1G představuje zobrazení území **včetně staveb a rostlinného pokryvu** ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky rostlinného pokryvu). Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013. DMP 1G je určen k analýzám výškových poměrů terénu (DMR 5G) a geografických objektů na něm se vyskytujících (stavby a rostlinný pokryv) regionálního a částečně i lokálního charakteru (ČÚZK, 2023b).

Na konci roku 2025 zveřejnil Zeměměřický úřad novou datovou službu nazvanou **Digitální model povrchu České republiky z obrazové korelace (DMP OK)**. Model vznikl metodou obrazové korelace leteckých měřických snímků pořízených primárně pro Ortofoto ČR. Datová sada je dostupná ve formě bodového mračna uspořádaného do pravidelné sítě (0,2 × 0,2 m), a v rastrovém formátu (0,5 × 0,5 m), který vzniká interpolací z bodového mračna. Od roku 2025 bude probíhat **periodická aktualizace**, která bude synchronizována s aktualizacím cyklem produktu Ortofoto ČR (ČÚZK, 2025).

4.4.3 Zdroje prostorových 3D dat pro budovy

Obvyklým předpokladem pro tvorbu 3D modelů měst jsou **polygony budov** a **výšková měření**, která se běžně získávají pomocí fotogrammetrie a laserového skenování (Biljecki et al., 2017). Navzdory tomu, že **polygony budov** jsou nyní **široce dostupné** jako otevřená data a volně poskytované geoinformace (Hartmann et al., 2016), **pořízení výškových dat** je stále **nákladné a časově náročné**, což brání tvorbě a dostupnosti 3D modelů měst (Wendel et al., 2016). Tvorbou 3D modelů budov pomocí fotogrammetrie z UAV se zabýval například Trhan et al. (2016). I přes významné pokroky v dálkovém průzkumu Země nebudou ještě nějakou dobu k dispozici výšková data potřebná k vytvoření 3D modelů měst pro mnoho oblastí na celém světě. Ve skutečnosti mnoho vyspělých zemí stále nemá národní pokrytí výškovými daty vhodnými pro tvorbu 3D modelů měst (Hartmann et al., 2016). Zaprvé mohou být výšková data zastaralá, jelikož mračna bodů se na rozdíl od polygonů budov poměrně složitě aktualizují a také se obvykle vytvářejí v méně častých intervalech. Za druhé, jejich rozlišení a kvalita nemusí být vždy dostatečně vhodná pro tvorbu 3D modelů měst (Biljecki et al., 2017).

Jedním z poskytovatelů globálních 3D dat o budovách za poplatek je německá společnost **ONEGEO**. Databáze ONEGEO obsahuje 1,7 miliard budov z více než čtyřiceti zdrojů a kromě 3D budov společnost poskytuje také 2D vrstvy a API (ONEGEO, 2023). Při bližším prozkoumání ale výška některých budov z databáze neodpovídá reálnému stavu. Volně dostupným řešením jsou **3D budovy z OpenStreetMap** (OSM, 2023), nicméně i tato data jsou na základě vizuální analýzy z hlediska výškové přesnosti velmi nepřesná (obr. 15).



Obr. 15: Porovnání dvou zdrojů 3D dat pro budovy (OpenStreetMap – vlevo, ONEGEO – uprostřed) s velmi přesným 3D modelem vzniklým fotogrammetrií (Google Earth – vpravo)
(zdroj: Esri 2023a; ONEGEO 2023; Google 2023)

Alternativním řešením je **použití údajů o počtu podlaží budov**, a tyto hodnoty **vynásobit konstantou výšky podlaží**. Vzhledem k tomu, že počet podlaží je obecně považován za ukazatel výšky budovy, používá se pro tvorbu 3D modelů měst zejména v oblastech využívajících VGI (Volunteered Geographic Information), a to hlavně proto, že **informace o počtu podlaží je snazší na získání** než informace o přesné výšce budovy. Výška podlaží se v různých člancích liší a pohybuje se mezi 2,8 a 3,5 metry. Kromě toho se počet podlaží používá jako ukazatel výšky budovy ve výzkumech, kde nejsou vytvářeny 3D modely, např. při zkoumání vztahu mezi cenou stavby a výškou budovy (Biljecki et al., 2017). Správnost takto spočítané výšky se však **výrazně liší podle typu budovy** (např. kostel s jedním podlažím, ale trojnásobnou výškou podlaží).

Pro území Česka je možné tento postup aplikovat za použití dat z RÚIAN (Registr územní identifikace, adres a nemovitostí), která pro každý stavební objekt poskytují informaci o počtu podlaží (ČÚZK, 2023a). U velkého množství budov ale bohužel **není atribut o počtu podlaží vyplněn**, což značně komplikuje využití dat z RÚIAN pro tvorbu 3D budov. Popelka (2010) ve své diplomové práci pro výpočet výšky budov v ORP Olomouc použil data bloků budov z Digitálního modelu území (DMÚ 25), ke kterým připojil data z bodové vrstvy adresních bodů obsahujících informaci o počtu podlaží. Z těchto informací následně spočítal přibližnou výšku bloků budov.

Některá česká města poskytují data o budovách ve formě otevřených dat. **Datový portál města Brna** umožňuje stažení dat obsahujících počet podlaží budov v několika formátech (Statutární město Brno, 2023). **Geoportal Praha** nabízí data 3D budov s přesnou výškou zjištěnou pomocí fotogrammetrie. Digitální modelování bylo prováděno v systému Microstation a vytvořená data byla následně převedena do formátu 3D shapefile. Shapefiley jsou rozdělené po mapových listech 1 : 5 000. Kromě 3D shapefile je možné data stáhnout také ve formátu DGN nebo DWG (IPR Praha, 2019).

4.5 3D modely

Model je zjednodušená reprezentace reálného objektu, jevu nebo systému, který je vytvářen (modelován) za určitým účelem. Terminologický slovník ČÚZK definuje **3D model** následovně: *produkt 3D modelování, který může být zobrazen jako dvojrozměrný obraz pomocí speciálních procesů (např. 3D rendering) nebo použit k počítačové simulaci fyzického objektu; objekt může být též vytvořen fyzicky pomocí 3D tisku (ČÚZK, 2020b)*. Proces tvorby 3D modelu se nazývá **3D modelování**. 3D modelování je definováno jako *proces vytvoření a matematické reprezentace jakéhokoliv trojrozměrného povrchu objektu (živého nebo neživého) prostřednictvím specializovaného softwaru (ČÚZK, 2020c)*.

3D model může být jak **digitální** (např. 3D model v prostředí počítače) tak **analogový** (např. 3D model vytištěný na 3D tiskárně). Síla 3D modelů, map a dalších reprezentací reality spočívá částečně v jejich schopnosti abstrakce a výběru z reality, které usnadňují pochopení reálného světa (Jahnke et al., 2011). Množství detailů zachycených v 3D modelu, a to jak z hlediska geometrie, tak atributů, se souhrnně označuje jako **úroveň detailu (LOD – Level of Detail)** a udává, jak důkladně byl prostorový rozsah modelován. V důsledku toho je LOD základním pojmem v geoinformatice a 3D modelování měst (Biljecki, 2017). Nejčastěji se rozlišuje pět úrovní LOD (obr. 16):

- **LOD 0:** 2D reprezentace, například půdorysy budov
- **LOD 1:** tzv. krabicový model, zpravidla vzniklý rozšířením modelu v LOD0 o třetí dimenzi
- **LOD 2:** model se zjednodušeným tvarem střechy, zpravidla již obohacený o texturu nebo barvy
- **LOD 3:** detailní model s dveřmi, okny, případně dalšími detaily exteriéru
- **LOD 4:** rozšíření modelu v LOD3 o prvky interiéru



Obr. 16: Pět úrovní Level of Detail v OGC CityGML 2.0 (zdroj: Biljecki 2017)

Tato klasifikace byla vyvinuta v rámci iniciativy Special Interest Group 3D (SIG3D, 2023). Podrobněji se problematikou LOD zabývali např. Janečka a Váša, Gröger a Plümer nebo Luebke (Janečka a Váša, 2017; Gröger a Plümer, 2012; Luebke, 2012). S úrovní detailu úzce souvisí také technologie **BIM (Building Information Modeling – Informační model budovy)** – digitální reprezentace fyzických a funkčních charakteristik budov (Wang et al., 2013). Jedná se o soubor navzájem propojených digitálních informací, záznam grafických (2D, 3D) a negrafických dat o prvcích modelu budovy. Vzhledem k tomu, že GIS a BIM byly původně vyvinuty pro různé účely, při jejich integraci dochází k řadě problémů. Do budoucna se ale očekává jejich užší propojení (Liu et al., 2017). Jedním z nejpoužívanějších softwarů určených pro práci s BIM je **Revit** od společnosti **Autodesk** (Autodesk, Inc., 2025).

Khayyal et al. (2022) uvádí, že kombinace 3D modelování a geografických informačních systémů může poskytnout širokou škálu aplikací, jako je strojové učení, restaurátorské práce, analýza stínů, městské plánování a plánování krajiny, a umožňuje uživatelům vypořádat se s omezeními a limity 2D GIS. Příkladem 3D modelu v kontextu geoinformatiky a kartografie může být tvorba 3D modelu historického údolí řeky Vltavy na základě starých map (Cajthaml et al., 2019).

4.5.1 Formáty 3D modelů

V současné době nepanuje shoda na používání jednotného formátu pro ukládání 3D modelů. Jedním z nejstarších, avšak dodnes nejpoužívanějším formátem je **STL**. STL kóduje přibližnou geometrii povrchu 3D modelu pomocí trojúhelníkové sítě, přičemž ukládá pouze geometrii modelu, a proto je jedním z nejjednodušších a neúspěšnějších dostupných 3D formátů. Formát **OBJ** podporuje přibližné i přesné kódování geometrie povrchu, a na rozdíl od STL umožňuje ukládat informaci o barvě nebo textuře. Dalším rozšířeným 3D formátem je **Collada (DAE)**, která je využívána zejména v herním a filmovém průmyslu. Formát Collada podporuje geometrii, vzhled (barva, materiál, textury) a animace, a kromě toho je jedním z mála formátů podporujících kinematiku a fyziku. Collada ukládá data pomocí značkovacího jazyka XML. Z proprietárních formátů je třeba zmínit formát **3DS** vyvinutý společností Autodesk. 3DS uchovává pouze nejzákladnější informace o geometrii, vzhledu, scéně a animaci, a pro pokročilé informace o 3D modelu je nutné doplnit 3DS o formát MAX, resp. PRJ (All3DP, 2022).

Standardizace je nutná také při tvorbě městských 3D modelů, a to zejména pro dosažení jednotnosti geometrie a sémantiky. Hlavním formátem pro ukládání a sdílení 3D modelů měst je **CityGML**, standard OGC (OGC, 2023). Jeho cílem je identifikovat základní třídy, které lze použít k reprezentaci nejběžnějších tříd objektů pozorovaných v modelu prostorových 3D dat, a také složky těchto tříd, jejich atributy a interakce. Existuje více metod, které využívají datový model CityGML k řešení těchto problémů. Jednou z nich je **3DCityDB**, open-source databáze založená na Oracle Spatial nebo PostGIS, která ukládá datový model CityGML do relační databáze. Další volbou pro kódování CityGML je **CityJSON**, který reprezentuje část datového modelu CityGML pomocí JavaScript Object Notation (JSON). CityJSON byl vyvinut s ohledem na programátory, aby napomohl rychlé tvorbě nástrojů a rozhraní API, které jej podporují. Podle nedávných studií jsou nejpoužívanějšími výměnnými formáty pro 3D prostorové datové modely CityGML a CityJSON (Apeh a Abdul Rahman, 2023). CityJSON má menší velikost než CityGML založený na XML, takže je praktický pro online a mobilní vývoj, tj. podporuje využití 3D dat nad rámec výměny dat (Ledoux et al., 2019).

4.5.2 Programy pro 3D modelování

Pro tvorbu 3D modelů existuje **mnoho specializovaných programů**, z nichž každý nabízí různé nástroje a funkce, přičemž výběr programu vždy záleží na konkrétním účelu a cíli. Jedním z **nejpopulárnějších open-source programů pro 3D modelování**, animaci, renderování a tvorbu vizuálních efektů je **Blender**. Blender je známý svou vysokou flexibilitou a širokým spektrem nástrojů, a to včetně pokročilého modelování, texturování nebo simulací. **Pixologic ZBrush** je digitální sochařský nástroj, který kombinuje 3D/2,5D modelování, texturování a malování. Používá vlastní technologii „pixon“, která ukládá informace o osvětlení, barvě, materiálu, orientaci a hloubce bodů tvořících všechny objekty na obrazovce. Pro architektonické a urbanistické modelování se často používá software jako **AutoCAD** nebo **SketchUp**. Tyto programy poskytují nástroje pro vytváření a manipulaci s architektonickými objekty, vytváření plánů a vizualizací. V případě modelování většího množství objektů může být oproti CAD nebo SketchUp vhodnější využít tzv. procedurální modelování. Příkladem může být jeho využití pro rekonstrukci městské krajiny pro účely webové prezentace (Cajthaml a Tobiáš, 2016).

4.5.3 Herní enginey

V posledních letech se také objevují nové technologie a programy pro 3D modelování se zaměřením na virtuální a rozšířenou realitu. Programy jako **Unity**, **Unreal Engine** nebo **Adobe Substance 3D Modeler** umožňuje tvůrcům vytvářet interaktivní 3D scény a simulace, které mohou být použity v různých oblastech, včetně her nebo vzdělávání. 3D modelovací programy se hojně využívají také ve filmovém a herním průmyslu a v počítačové animaci (Ali3DP, 2023; Future PLC, 2022). Grafické enginey jsou velmi **výkonné** a poskytují **detailní interaktivní virtuální prostředí** v různých měřítkách.

Ačkoliv Corbett a Wade již v roce 2005 zkoumali možnosti herních engineů pro 3D kartografii a poukazovali na **tehdejší limity v přesnosti dat** Corbett a Wade (2005), situace se za poslední dvě dekády radikálně změnila. Původní překážka v podobě tzv. „floating-point errors“ (chyb v pohyblivé řádové čárce při velkých vzdálenostech) byla u moderních engineů odstraněna zavedením podpory pro „double-precision“ souřadnice, např. Large World Coordinates v Unreal Engine 5 (Epic Games, 2026). To umožňuje vizualizovat **rozsáhlá geografická území s geodetickou přesností**, což dříve nebylo v herním prostředí možné. Klíčovým faktorem pro adopci těchto nástrojů v geoinformatice se stal **nástup specializovaných integračních nástrojů**, jako jsou **ArcGIS Maps SDK for Game Engines** (Esri, 2026) nebo **Cesium for Unreal** (Cesium GS, 2026). Tyto nadstavby umožňují přímé streamování masivních geoprostorových dat (např. formát 3D Tiles, mračna bodů, digitální modely reliéfu) přímo do herního prostředí bez nutnosti složité konverze. V současnosti je využívání herních engineů pro 3D geovizualizaci stále populárnější, jak ilustrují například práce Mata et al. (2014), Buyuksalihe et al. (2017), Harrapa et al. (2019), Holubce (2022), Deliganta (2022), Holuba (2024) nebo Janovského (2024).

4.6 Meteorologická a klimatická data

Meteorologická data sestávají z fyzikálních parametrů, které jsou měřeny přímo přístroji. Jedná se např. o teplotu, rosný bod, směr větru, rychlost větru, oblačnost, vrstvu (vrstvy) oblačnosti, viditelnost nebo aktuální počasí a množství srážek (US EPA, 2024). **Klimatická data** jsou záznamy pozorovaných klimatických podmínek pořízené na konkrétních místech a v určitém čase konkrétními přístroji podle souboru standardních postupů. Soubor klimatických dat obsahuje informace o klimatu v místech pozorování, jakož i další faktory nesouvisející s klimatem, jako je prostředí pozorovací stanice a informace o přístrojích a pozorovacích postupech (WMO, 2020). Geovizualizace jako **interdisciplinární oblast geoinformačních věd** se zaměřuje na **vizuální integraci a analýzu časoprostorových dat** na základě interakce uživatelů s těmito daty a jejich atributy v geoprostorovém kontextu. Poskytování vizualizačních metod na podporu prostorové kontextualizace a vizuální analýzy simulovaných meteorologických, resp. klimatických dat proto pomáhá odborníkům, poskytovatelům simulačních modelů klimatu a meteorologických dat **lépe porozumět interakcím a vzájemnému ovlivňování** simulovaných meteorologických, klimatických a městských dat (Christophe et al., 2022). Meteorologická a klimatická data jsou velmi často ukládána do **multidimenzionálních formátů**. Multidimenzionální data představují data zachycená ve více časech nebo ve více hloubkách či výškách. Běžné formáty pro ukládání multidimenzionálních rastrových dat jsou **netCDF** (oceánografická data), **GRIB** (klimatická a meteorologická data) a **HDF** (vědecká data, např. NASA). Tyto multidimenzionální formáty sdílejí společné možnosti pro ukládání více proměnných, přičemž každá proměnná je vícerozměrné pole (Esri, 2024). Efektivnímu využití barev ve vizualizaci meteorologických dat se věnovali Stauffer et al., přičemž doporučují využívat barevný model **HCL** (hue–chroma–luminance) místo běžného RGB (Stauffer et al., 2015).

4.6.1 Předpovědní model ALADIN

Model ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International) je numerický předpovědní model počasí na omezené oblasti pro krátkodobou předpověď atmosférických procesů ve vysokém rozlišení. Model je vyvíjen od roku 1991 v mezinárodní spolupráci vedené francouzskou povětrnostní službou **Météo-France**. Dnes na modelu spolupracuje 16 zemí, včetně ČR. ALADIN je v ČHMÚ operativně počítán 4x za den na superpočítači NEC-LX (OPŽP, 2023). Výpočet modelu (předpověď) probíhá tak, že nejdříve se ve středisku Météo-France v Toulouse vypočte méně podrobný globální model **ARPÉGE**. Jeho výsledky se pak přenesou do jednotlivých členských zemí a zde se v modelu ALADIN zpřesňují pro konkrétní území. Rozlišení globálního modelu ARPÉGE je 15 km (Pokorný, 2023). Rozlišení verze ALADIN, počítané v Českém hydrometeorologickém ústavu, bylo do roku 2019 4,7 km. Od roku 2019 se v ČR rozlišení modelu zvýšilo na 2,3 km (Nature Media, 2023).

4.6.2 Data poskytnutá pro potřeby disertační práce

Pro **potřeby disertační práce** byla Českým hydrometeorologickým ústavem poskytnuta data předpovědního modelu **ALADIN** ve formátu **GRIB**. Poskytnutá data jsou dostupná za rok **2014** po hodinách, pokrývají téměř celou Evropu a obsahují různé meteorologické veličiny (např. teplota, vlhkost, rychlost větru) v několika tlakových hladinách (tab. 4). GRIB je formát souborů pro ukládání a přenos rastrových meteorologických dat, například výstupů numerických modelů předpovědi počasí. Je navržen tak, aby byl samopopisný, kompaktní a přenosný napříč počítačovými architekturami. Standard GRIB navrhla a udržuje Světová meteorologická organizace (Government of Canada, 2023).

Tab. 4: Popis dat modelu ALADIN poskytnutých ČHMÚ pro potřeby disertační práce

popis	veličina	jednotky	hladina	označení souboru
rotovaná složka větru, kladná k východu	U	m s^{-1}	1000 hPa	P00000WIND_U_COM
			925 hPa	P92500WIND_U_COM
			850 hPa	P85000WIND_U_COM
			700 hPa	P70000WIND_U_COM
			500 hPa	P50000WIND_U_COM
			200 hPa	P20000WIND_U_COM
rotovaná složka větru, kladná k severu	V	m s^{-1}	1000 hPa	P00000WIND_V_COM
			925 hPa	P92500WIND_V_COM
			850 hPa	P85000WIND_V_COM
			700 hPa	P70000WIND_V_COM
			500 hPa	P50000WIND_V_COM
			200 hPa	P20000WIND_V_COM
vertikální složka větru, kladná nahoru	W	m s^{-1}	1000 hPa	P00000VERT.VELOCIT
			925 hPa	P92500VERT.VELOCIT
			850 hPa	P85000VERT.VELOCIT
			700 hPa	P70000VERT.VELOCIT
			500 hPa	P50000VERT.VELOCIT
			200 hPa	P20000VERT.VELOCIT
specifická vlhkost	QV	kg/kg	1000 hPa	P00000HUMI.SPECIFI
			925 hPa	P92500HUMI.SPECIFI
			850 hPa	P85000HUMI.SPECIFI
			700 hPa	P70000HUMI.SPECIFI
			500 hPa	P50000HUMI.SPECIFI
			200 hPa	P20000HUMI.SPECIFI
teplota	T	K	1000 hPa	P00000TEMPERATURE
			925 hPa	P92500TEMPERATURE
			850 hPa	P85000TEMPERATURE
			700 hPa	P70000TEMPERATURE
			500 hPa	P50000TEMPERATURE
			200 hPa	P20000TEMPERATURE
geopotenciál	gH	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	1000 hPa	P00000GEOPOTENTIEL
			925 hPa	P92500GEOPOTENTIEL
			850 hPa	P85000GEOPOTENTIEL
			700 hPa	P70000GEOPOTENTIEL
			500 hPa	P50000GEOPOTENTIEL
			200 hPa	P20000GEOPOTENTIEL

5 HORIZONTÁLNÍ ROVINY A VÝBĚR PROGRAMU

Vizualizace dat ve formě horizontálních rovin je jednou ze základních metod 3D geovizualizace. Reprezentace pomocí **série horizontálních rovin** spočívá podle [Gautiera \(2020\)](#) v reprezentaci 3D dat prostřednictvím **série 2D řezů** odpovídajících vždy jedné výškové úrovni, a v reprezentaci každého z těchto 2D řezů pomocí horizontální roviny, která tvoří řadu horizontálních rovin umístěných nad sebou. Vykreslování 3D dat pomocí řady horizontálních rovin přináší problém s překrýváním mezi rovinami. Nabízí se tedy možnost použití průhlednosti, aby bylo možné zobrazit různé hodnoty dat ([Gautier et al., 2020b](#)). Při 3D geovizualizaci, stejně tak jako při každé jiné prostorové vizualizaci, jsou klíčové **grafické proměnné**. Jejich hodnocením je možné zjistit silné a slabé stránky jednotlivých vizualizačních metod, a jejich vhodnost pro různý charakter dat.

Tato kapitola vychází z článku *Evaluation of 3D geovisualization of volumetric geospatial data in the form of horizontal planes using selected software* ([Zejdlik a Vozenilek, 2024](#)).

5.1 Kartografická sémiologie ve 3D

Grafická sémiologie (sémiotika) je věda o znacích a znakových systémech, jejich tvorbě a užívání. **Kartografická sémiologie** aplikuje grafickou sémiologii na kartografii, přičemž se zabývá teorií tvorby a užívání kartografických znaků. Za zakladatele grafické, resp. kartografické sémiologie je považován **Jacques Bertin** ([Pravda, 2006](#)). Základní pojem kartografické sémiologie je **kartografický znak**, který představuje libovolný grafický prostředek nebo souhrn prostředků, který je schopen být nositelem významu a něco v kartografickém díle vyjadřovat ([Kaňok, 1992](#)). Za sémiologická pravidla lze považovat:

- **parametry kartografických znaků** (grafické, resp. vizuální proměnné) definované Jacquesem Bertinem v roce 1967 ([Bertin, 1967](#)), které byly postupně rozšiřovány dalšími autory, a
- **aspekty kartografických znaků** (syntaktický, sémantický, sigmatický a pragmatický aspekt) definované Ulrichem Freitagem v roce 1971 ([Freitag, 1971](#)).

Grafické, resp. vizuální proměnné (visual variables) popisují grafické rozměry, v nichž lze mapu nebo jinou vizualizaci měnit a kódovat tak informace (obr. 17). Grafické proměnné jsou **rozdíly v prvcích mapy vnímané lidským okem**. Bez ohledu na typ mapy se jedná o základní způsoby rozlišení grafických symbolů ([Axis Maps, 2023](#)). Hodnocením účinnosti a efektivity vizuálních proměnných pro vizualizaci geografických informací se zabývali například [Garlandini a Fabrikant \(2009\)](#). Vizuální proměnné původně popsal francouzský kartograf Jacques Bertin (1918-2010) v knize *Sémiologie Graphique (Semiology of Graphics)* v původním vydání z roku 1967, přepracovaném v roce 1983 ([Roth, 2017](#)). Původní tzv. „retinální proměnné“ ([Bertin, 1967](#)) zahrnovaly:

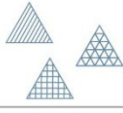
- **polohu** (position),
- **velikost** (size),
- **tvar** (shape),
- **jas barvy** (color value),
- **tón barvy** (color hue),
- **orientaci** (orientation),
- **texturu/vzor** (texture/pattern).

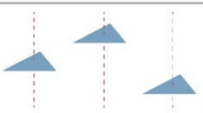
Tento seznam byl poté postupně dalšími kartografy (Morrison, 1974; MacEachren, 2004; Roth, 2017) rozšířen o:

- **sytost barvy** (color saturation),
- **uspořádání** (arrangement),
- **nejistotu** (crispness/fuzziness),
- **rozlišení** (resolution),
- **průhlednost** (transparency).

3D prostředí navíc umožňuje sledování dalších grafických proměnných, jako je např. **perspektiva**, **kamera**, **osvětlení**, **stínování**, **atmosférické efekty** (Krejčí, 2018), **výška**, **extruze**, **povrch objektu** (vzor, stínování), **vyzařování světla** (Limberger et al., 2023) nebo **mlha** (Vetter, 2023). S ohledem na cíle práce byly pro hodnocení metod 3D geovizualizace vybrány čtyři 3D grafické proměnné, a to:

- **výška** (height) – vertikální rozměr znaku,
- **extruze** (extrusion) – rozšíření 2D objektu do třetího rozměru,
- **kamera** (camera) – místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá,
- **perspektiva** (perspective) – způsob, jakým jsou objekt nebo scéna vykresleny, aby působily realisticky v rámci hloubky a prostoru.

2D GRAFICKÉ PROMĚNNÉ					
					
poloha	velikost	tvar	jas barvy	tón barvy	orientace
					
textura/vzor	sytost barvy	uspořádání	nejistota	rozlišení	průhlednost

3D GRAFICKÉ PROMĚNNÉ			
			
výška	extruze	kamera	perspektiva

Obr. 17: Grafické proměnné vybrané pro hodnocení metod 3D geovizualizace tematických dat

Mezi aspekty kartografických znaků patří:

- **syntaktický aspekt:** odlišení jednotlivých znaků na základě odlišností znázorňovaných jevů; shodné/podobné/různé jevy jsou znázorňovány shodnými/podobnými/různými znaky,
- **sémantický aspekt:** vymezení významu znaku; vysvětlení významu znaku ve znakovém klíči,
- **sigmatický aspekt:** znak se významem nebo grafickými proměnnými na určité úrovni podrobnosti přibližuje znázorňovanému jevu,
- **pragmatický aspekt:** znak by měl u uživatele co nejvýstižněji a nejnázorněji vybavovat znázorňovaný jev na základě osobních zkušeností (Voženílek et al., 2011).

Aspekty kartografických znaků platí pro všechny metody 3D geovizualizace tematických dat víceméně shodně. Stejně 3D znaky by měly znázorňovat stejné jevy, podobné znaky podobné jevy, a různé znaky různé jevy – **syntaktický aspekt**. Znaky by měly mít jasně specifikovaný význam – **sémantický aspekt**. Znaky by se měly svými 2D i 3D grafickými proměnnými co nejvíce podobat znázorňovanému jevu (např. tvarem, velikostí, barvou) – **sigmatický aspekt**. Znaky by měly uživateli co nejvýstižněji evokovat znázorňovaný jev (např. teplota – chladné oblasti modře, teplé oblasti červeně) – **pragmatický aspekt**. Správnost aspektů vždy závisí na kartografovi a jeho schopnostech vhodně navrhnout znakový klíč. Naopak **parametry kartografických znaků** (grafické proměnné) jsou napříč metodami velmi proměnlivé. Jedna metoda může využívat několik grafických proměnných, přičemž některé mohou být významnější než ostatní. Proměnné mohou být také ovlivněny charakterem dat, účelem geovizualizace a dalšími faktory. **Z těchto poznatků vyplývá, že v kontextu metod 3D geovizualizace připadá v úvahu hodnotit zejména grafické proměnné, jejichž parametry výrazně ovlivňují vnímání vizualizace uživatelem.** Grafické proměnné byly u metod 3D geovizualizace hodnoceny z hlediska **významnosti** na škále 1 až 5 (1 – nevýznamná, 5 – velmi významná).

5.2 Metody 3D geovizualizace ve formě horizontálních rovin

Horizontální rovina je způsob zobrazení prostorových dat, kdy celá datová sada má konstantní výškovou (Z) souřadnici a liší se pouze způsobem zobrazení, jako je barva buňky. Vizualizace horizontálních rovin formou statických výstupů je značně limitující, protože se při zobrazení více rovin v různých výškových úrovních překrývají. Z tohoto důvodu je žádoucí používat tento typ vizualizace v **interaktivním prostředí**, které je také nutné pro vizuální analýzu a průzkum dat. Ideálně by takové prostředí mělo umět např. filtrovat data, poskytovat analytické funkce nebo vytvářet animace umožňující interaktivní vizuální analýzu na základě požadavků uživatele. Dále jsou představeny **čtyři metody 3D geovizualizace ve formě horizontálních rovin**, z nichž každá má své výhody i nevýhody a je vhodná pro jiný typ zobrazovaných dat. 3D data lze vizualizovat ve formě horizontálních rovin pomocí následujících metod:

- **jedna rovina** (Single Plane),
- **více rovin bez průhlednosti** (Multiple Planes without Transparency),
- **více rovin s průhledností** (Multiple Planes with Transparency),
- **překrytí dvou rovin na stejné úrovni** (Two Planes Overlay).

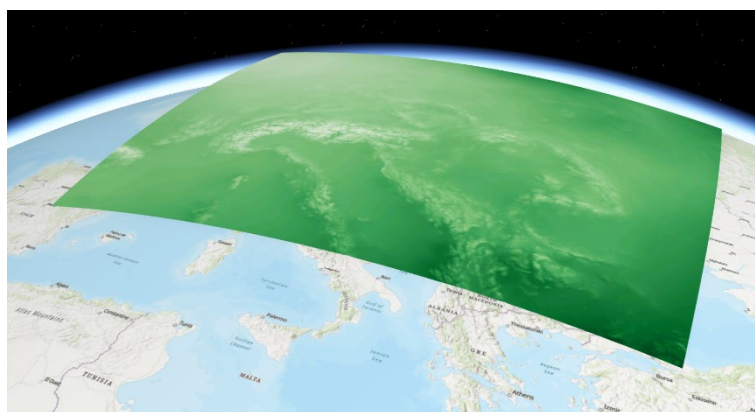
Všechny čtyři metody byly zhodnoceny z hlediska grafických proměnných. Některé proměnné jsou v případě rastrových dat ve formě horizontálních rovin pevně dané, a nelze je nijak upravovat. Jedná se o **polohu** (umístění v prostoru), **velikost** (rozsah dat), **tvar**, **orientaci**, **extruzi** (horizontální roviny nemají třetí dimenzi), **texturu/vzor** (na pixely nelze aplikovat texturu nebo vzor, ale pouze barvu). Z toho důvodu nebyly tyto proměnné pro žádnou ze čtyř metod 3D geovizualizace ve formě horizontálních rovin hodnoceny.

U dalších tří proměnných (nejistota, rozlišení a perspektiva) platí pro všechny čtyři metody stejná tvrzení. **Nejistota** (významnost 3) hraje ve vizualizaci tematických kvantitativních (např. meteorologických) dat poměrně významnou roli, přičemž existuje mnoho metod, jak ji znázornit (Brus, 2013). V případě rastrových dat je možné nejistotu znázornit například jasnou barvou. **Rozlišení** (významnost 4) ovlivňuje zrnitost výsledného obrazu – vysoké rozlišení znamená podrobnější a plynulejší vizualizaci, což má ale za důsledek větší objem dat. Při interaktivním prohlížení a přepínání vrstev se může velký objem dat projevit pomalým načítáním. Je tedy potřeba rozlišení optimalizovat v závislosti na počtu vrstev, objemu dat,

možnostech vizualizačního prostředí a dalších parametrech. Z hlediska **perspektivy** (významnost 3) mohou být roviny vykresleny bez nebo se zohledněním zakřivení Země. Volba vhodného způsobu perspektivy záleží na účelu vizualizace.

5.2.1 Jedna rovina (Single Plane)

Nezákladnější metodou vizualizace 3D tematických dat ve formě horizontálních rovin je vizualizace pouze **jedné roviny** (obr. 18). Roviny mohou být zobrazeny buď paralelně pomocí lokální scény, nebo v globální scéně s ohledem na zakřivení Země. Při vizualizaci jedné roviny je také možné upravit její **průhlednost**, což umožňuje lepší orientaci díky viditelné **topografii**. Průhlednost však zkresluje použitou metodu vizualizace, což může narušit vizuální analýzu. Výhodou vizualizace v podobě jedné roviny je její **jednoduchost**, **viditelnost celé roviny** a **možnost využití průhlednosti**. Nevýhodou je nemožnost vizuální analýzy vztahů mezi různými meteorologickými proměnnými, různými tlakovými hladinami nebo srovnáním v různých časech. To lze vyřešit vytvořením animací s různými parametry. Hodnocení grafických proměnných pro metodu „horizontální roviny – jedna rovina“ je znázorněno v tabulce 5.



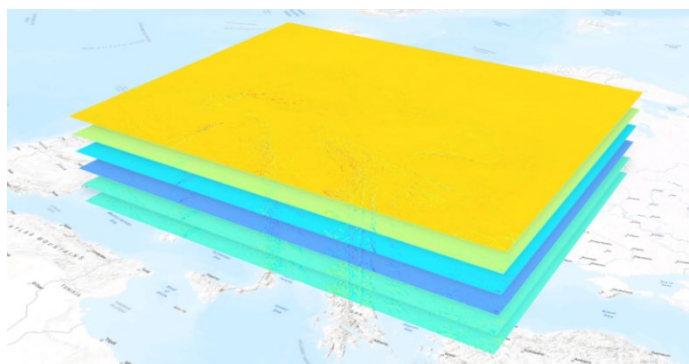
Obr. 18: Vizualizace dat modelu ALADIN – jedna rovina

Tab. 5: Hodnocení grafických proměnných – horizontální roviny (jedna rovina)

horizontální roviny – jedna rovina (Single Plane)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Jas, tón a sytost barvy je třeba vhodně zvolit podle zobrazovaného jevu a charakteru dat (např. divergentní stupnice pro znázornění teploty – modré tóny pro chladné oblasti, červené tóny pro teplé oblasti).
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
uspořádání	-	Uspořádání nelze hodnotit, jelikož se jedná pouze o jednu rovinu.
průhlednost	3	Použití průhlednosti v případě zobrazení jedné roviny umožňuje částečnou viditelnost topografického podkladu (např. hranice států, města). Při špatném nastavení může ale průhlednost zkreslovat vizualizaci z důvodu prolínání barev tematické vrstvy a podkladu.
výška	2	Rovina může být zobrazena v libovolné výšce. Pokud je ale umístěna příliš blízko zemskému povrchu a není použita průhlednost, nelze optimálně zobrazit například topografii pod rovinou. Naopak pokud je rovina umístěna příliš vysoko, snižuje se schopnost správné prostorové lokalizace roviny vzhledem k zemskému povrchu. Výška by měla být zvolena s ohledem na prostorový rozsah dat a účel vizualizace.
kamera	1	Jelikož se jedná pouze o jednu rovinu, je plně viditelná ze všech úhlů.

5.2.2 Více rovin bez průhlednosti (Multiple Planes without Transparency)

Při zobrazení více rovin **v různých výškových úrovních** (obr. 19) lze zobrazená data porovnávat. Problémem je však překrývání vrstev, které **znemožňuje**, aby byla všechna data **současně viditelná**. Řešením může být funkce **svislého posuvníku** (swipe), která by umožnila zobrazení údajů pouze v určité výšce, kterou si uživatel může dynamicky měnit. Tento typ vizualizace je vhodný pro porovnávání stejné meteorologické proměnné, ale v různých časech nebo nadmořských výškách. Je však nutné nastavit **optimální rozestup mezi vrstvami**, který závisí na měřítku a zobrazovaných datech. Nemožnost zobrazení topografie na zemském povrchu lze vyřešit například použitím státních hranic a popisu, které by byly vždy zobrazeny v nejvyšší vrstvě. Výhodou vizualizace více rovin bez průhlednosti je **možnost porovnávat vztahy mezi vrstvami**. Nevýhodou jsou překrývající se data a neviditelnost topografie. Hodnocení grafických proměnných pro metodu „horizontální roviny – více rovin bez průhlednosti“ je znázorněno v tabulce 6.



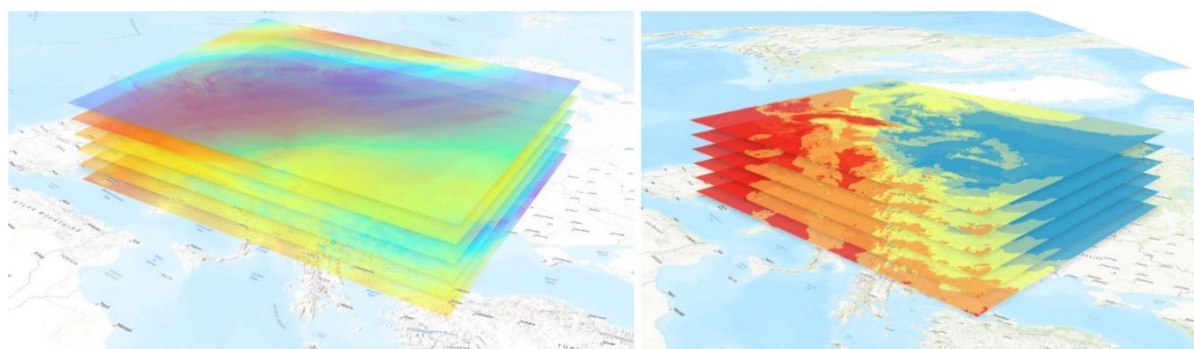
Obr. 19: Vizualizace dat modelu ALADIN – více rovin bez průhlednosti

Tab. 6: Hodnocení grafických proměnných – horizontální roviny (více rovin bez průhlednosti)

horizontální roviny – více rovin bez průhlednosti (Multiple Planes without Transparency)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Barevná stupnice by měla být pro všechny roviny shodná, aby bylo možné je vzájemně porovnávat. Například při zobrazení průměrné teploty vzduchu v různých výškách by měl být na první pohled zřejmý teplotní trend v závislosti na nadmořské výšce. Z toho důvodu je vhodné zobrazovat ve všech vrstvách stejnou veličinu. Kombinace různých veličin je při tomto typu vizualizace možná také, nicméně větší množství různých veličin může zhoršit uživatelskou interpretaci.
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
uspořádání	4	Pokud data obsahují informace například o nadmořské výšce, měly by být vrstvy uspořádány na základě tohoto atributu (nízké hodnoty blíže zemskému povrchu, vysoké hodnoty ve vyšších nadmořských výškách), aby se vizualizace přibližovala realitě.
průhlednost	-	Průhlednost u této metody není použita.
výška	3	Výška roviny, resp. vertikální vzdálenost mezi rovinami, může být nastavena buď fixně (například 100 km) nebo může být variabilní podle určitého atributu. V případě dat modelu ALADIN mohou být příkladem výškového atributu různé tlakové hladiny, ve kterých jsou meteorologické veličiny zaznamenávány (např. 500 hPa, 700 hPa).
kamera	4	V případě zobrazení více rovin nad sebou bez použití průhlednosti dochází k jejich překrytí. Proto je důležité, aby měl uživatel možnost manipulovat s kamerou, což mu umožní vidět celý rozsah všech rovin.

5.2.3 Více rovin s průhledností (Multiple Planes with Transparency)

Průhlednost lze použít k vizualizaci **více rovin** v různých výškách (obr. 20). To **částečně řeší překrývání dat** a umožňuje porovnávat prostorové vztahy. Je však nutné nastavit optimální hodnotu průhlednosti, aby byly vrstvy snadno rozlišitelné a neslévaly se. Stejně jako u více rovin bez průhlednosti je dobré použít **posuvník** (swipe) nebo zobrazení topografie v horní vrstvě. U tohoto typu vizualizace by měla být pro všechny vrstvy použita stejná barevná škála a datový rozsah, aby bylo možné data porovnávat. Je však obtížné prezentovat tyto výsledky ve formě statického výstupu, protože pro vizuální analýzu 3D dat je potřeba **dynamické prostředí**. Výhodou vizualizace více rovin s průhledností je možnost porovnávat vztahy mezi vrstvami a částečné rozlišení překrývajících se dat díky průhlednosti.



Obr. 20: Vizualizace dat modelu ALADIN – více rovin s průhledností

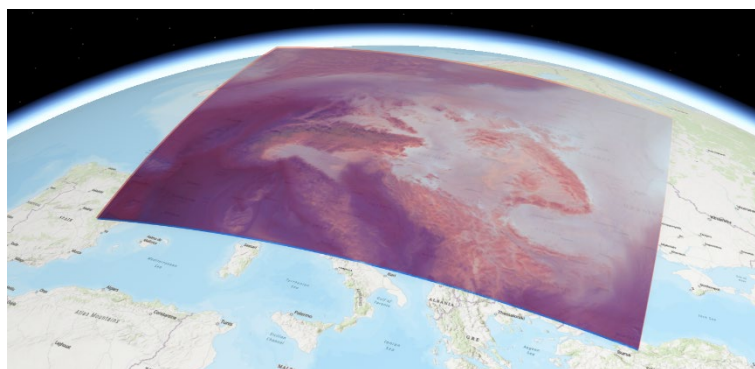
Nevýhodou vizualizace více rovin je poměrně špatná interpretace v případě statických výstupů. Z toho důvodu je vhodné takto vizualizovaná data zobrazovat v interaktivním 3D vizualizačním prostředí, které umožní uživateli volný průzkum dat (otáčení, zoom, filtrování vrstev). Pro vizuální analýzu více rovin se nabízí také použití **animace**. Ta může být buď **neřízená** (předpřipravená) nebo **řízená**, při které může uživatel například vybrat vrstvy, které ho zajímají, nebo nastavit časový krok. Hodnocení grafických proměnných pro metodu „horizontální roviny – více rovin s průhledností“ je znázorněno v tabulce 7.

Tab. 7: Hodnocení grafických proměnných – horizontální roviny (více rovin s průhledností)

horizontální roviny – více rovin s průhledností (Multiple Planes with Transparency)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Platí podobné tvrzení, jako u více rovin bez průhlednosti. Rastrová data ve formě horizontálních rovin lze vizualizovat buď spojitě nebo data klasifikovat do intervalů, přičemž při vizualizaci klasifikovaných dat nedochází k takovému zkreslení barev jako při spojitě vizualizaci.
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
uspořádání	4	Stejně jako v případě více rovin bez průhlednosti by měly být roviny logicky uspořádány na základě vybraného atributu (např. nadmořská výška, tlaková hladina).
průhlednost	5	Průhlednost může pomoci částečně vyřešit problém překryvu. Přináší však další problémy, jako je například splývání barev mezi vrstvami nebo s topografickým podkladem.
výška	3	Pro řešení problému překryvu vrstev lze použít vertikální posuvník (vertical swipe), který by umožnil zobrazení dat pouze v určité uživatelsky volitelné výšce.
kamera	4	Použití průhlednosti částečně řeší překryv vrstev, ale i přesto je nutné umožnit uživateli rotaci scény, pro zajištění kvalitnější explorační dat.

5.2.4 Překryv dvou rovin na stejné úrovni (Two Planes Overlay)

Čtvrtou možností pro vizualizaci horizontálních rovin je jejich **překrytí ve stejné výškové úrovni** (obr. 21). Při správném nastavení barev lze jejich kombinací získat nové informace. Tato metoda je vhodná pro porovnávání různých dat ve stejném čase a výšce, ale je **obtížněji interpretovatelná** než předchozí. To lze vyřešit pomocí funkce **horizontálního posuvníku** (swipe), který by uživateli umožnil vrstvy postupně překrývat. Posuvníkem by bylo možné ovládat jednu nebo obě vrstvy. Vizualizace je omezena na **dvě vrstvy**, protože správná interpretace by byla nemožná, pokud by se překrývalo více vrstev. Hodnocení grafických proměnných pro metodu „horizontální roviny – překryv dvou rovin na stejné úrovni“ je znázorněno v tabulce 8.



Obr. 21: Vizualizace dat modelu ALADIN – překryv dvou rovin na stejné úrovni

Tab. 8: Hodnocení grafických proměnných – horizontální roviny (překryv dvou rovin na stejné úrovni)

horizontální roviny – překryv dvou rovin na stejné úrovni (Two Planes Overlay)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Při správném nastavení barev je za použití průhlednosti možné získat kombinací vrstev nové informace. Například při zobrazení teploty vzduchu pomocí červené barvy a vlhkosti pomocí modré barvy by při jejich překrytí vznikla vrstva v tónech fialové, přičemž by platilo „čím tmavší fialová barva, tím vyšší hodnoty obou proměnných“.
tón barvy	5	
sytnost barvy	5	
uspořádání	1	Uspořádání vrstev nehraje významnou roli, jelikož jsou roviny umístěny na stejné výškové úrovni.
průhlednost	5	Průhlednost je velmi důležitá, jelikož její nastavení má významný vliv na správnou interpretaci informací vzniklých z kombinace vrstev.
výška	2	Platí podobné tvrzení jako v případě jedné roviny. Roviny jsou zobrazeny na stejné výškové úrovni, která by se měla odvíjet od rozsahu dat a účelu vizualizace.
kamera	1	Vizualizace vzniklá z kombinace dvou vrstev by měla být viditelná ze všech úhlů. Je však vhodné použít posuvník pro postupné překrývání vrstev.

5.2.5 Srovnání metod

Při 3D geovizualizaci metodou horizontálních rovin se uplatňuje deset grafických proměnných: jas, tón a sytost barvy, uspořádání, nejistota, rozlišení, průhlednost, výška, kamera a perspektiva (tab. 9). U všech čtyř metod hraje nejdůležitější roli **jas**, **tón** a **sytost barvy**, jelikož se jedná o hlavní nositele informace. Dalšími důležitými proměnnými jsou **rozlišení** a **průhlednost**. **Uspořádání** a **kamera** jsou poměrně významné pro metody zobrazující více rovin.

Tab. 9: Porovnání metod 3D geovizualizace formou horizontálních rovin z hlediska významnosti grafických proměnných

grafická proměnná	významnost			
	jedna rovina	více rovin bez průhlednosti	více rovin s průhledností	překryv dvou rovin na stejné úrovni
jas barvy	5	5	5	5
tón barvy	5	5	5	5
sytost barvy	5	5	5	5
uspořádání	-	4	4	1
nejistota	3	3	3	3
rozlišení	4	4	4	4
průhlednost	3	-	5	5
výška	2	3	3	2
kamera	1	4	4	1
perspektiva	3	3	3	3

5.3 Vizualizace horizontálních rovin ve 3D prostředí různých programů

Pro výběr programu pro další fázi výzkumu bylo na začátku vybráno **sedm programů**, které mají potenciál umožnit **vizuální analýzu 3D dat**. Jedná se jak o **volně dostupný software** (open-source i proprietární), **freemium** (základní funkcionality zdarma, pokročilá funkcionality za příplatek) nebo **komerční software**, jehož licence je k dispozici na Katedře geoinformatiky UP. Každý z nich byl testován z hlediska **podpory prostorových dat**, **podpory prostorových analytických funkcí** nebo **možností vizualizace 3D prostorových dat**. Vybrané programy (software) byly rozděleny do tří kategorií: geografické informační systémy, webová řešení a programy pro počítačovou 3D grafiku.

Vizualizace ve formě horizontálních rovin byla zvolena pro ukázkou 3D prostředí jednotlivých programů. Horizontální roviny však slouží pouze pro demonstraci a programy byly hodnoceny komplexně. U každého programu byla hodnocena čtyři kritéria na stupnici od 1 do 5, přičemž 1 je nejhorší výsledek a 5 nejlepší. Průměrná hodnota těchto čtyř kritérií ukazuje celkovou vhodnost vizuální analýzy ve 3D. Popis každého kritéria je následující:

- **podpora prostorových dat:** Podporuje software formáty prostorových dat, které umožňují 3D geovizualizaci?
- **podpora 3D geovizualizace:** Umožňuje software 3D geovizualizace? Pokud ano, umožňuje pouze základní vizualizaci nebo nabízí pokročilejší funkce (např. realistický znakový klíč, osvětlení scény, animace)?
- **podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D:** Nabízí software 3D analytické funkce (filtrování vrstev, měření, horizontální nebo vertikální posuvníky)?
- **možnost vytvářet 3D aplikace:** Je možné pomocí softwaru vytvořit 3D aplikaci a následně ji sdílet?
- **vhodnost vizuální analýzy ve 3D:** Je software celkově vhodný pro vizuální analýzu ve 3D? Průměrná hodnota čtyř předchozích kritérií.

5.3.1 Geografické informační systémy

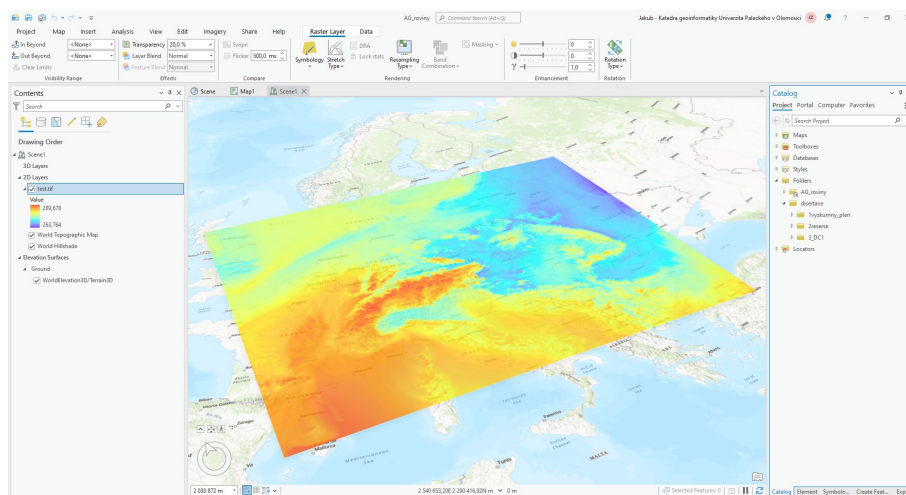
Při práci s dvoudimenzionálními prostorovými daty jsou **geografické informační systémy** jasnou volbou. Umožňují **podporu velkého množství formátů** včetně jejich **konverze**, prostorové **analytické funkce**, správu a organizaci dat a **pokročilé metody geovizualizace** a tvorby map. Při vizualizaci 3D dat ale GIS nemusí být vždy vhodný, jelikož 3D geovizualizace zatím nejsou v GIS standardem, a drtivá většina GIS nedisponuje možnostmi pokročilé 3D geovizualizace. U některých softwarů, jako je např. ArcGIS Pro, je však již práce s 3D daty podporována na velmi dobré úrovni, a jsou zde umožněny např. analýzy a modelování ve 3D. Pro hodnocení vhodnosti programů pro 3D vizuální analýzu byly vybrány dva nejrozšířenější geografické informační systémy – **ArcGIS Pro** a **QGIS**.

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro je desktopový GIS vyvinutý společností Esri dostupný v rámci komerční licence. Podporuje širokou škálu datových formátů prostorových dat, a to jak souborové formáty, databáze nebo webové služby, a to včetně multidimenzionálních dat (např. NetCDF). ArcGIS Pro podporuje vizualizaci dat, pokročilé analýzy a správu dat ve 2D, 3D a 4D (Esri, 2023c). 3D geovizualizaci je možné provádět buď v lokální (rovinné – obr. 22) nebo globální scéně (zakřivení Země). Kromě základních navigačních funkcí (pan, zoom, orbit) umožňuje ArcGIS Pro také celou řadu **pokročilých funkcí pro 3D editaci, analýzu a vizualizaci** (např. 3D vizualizace budov pomocí **extruze polygonů**, **realistický znakový klíč** formou 3D modelů, realistický vzhled vody, tvorba animací, analýzy viditelnosti). Velkou výhodou je také možnost použití tzv. sliderů, které umožňují interaktivní vizuální filtrování obsahu na základě časového nebo prostorového rozsahu. ArcGIS Pro také disponuje možnostmi přidání **atmosférických efektů** (např. východ a západ Slunce, vržený stín), což 3D vizualizacím dodává realistický vzhled. Vytvořené 3D scény lze také sdílet na ArcGIS Online a následně z nich vytvořit webovou mapovou aplikaci (např. pomocí WebAppBuilder) nebo StoryMap. Veškeré informace o 3D vizualizaci v ArcGIS Pro jsou zdokumentovány na webových stránkách společnosti Esri formou uživatelsky přívětivých návodů a dokumentací. ArcGIS Pro se zdá **velmi vhodný pro vizuální analýzu** 3D dat, a to zejména díky pokročilé podpoře 3D dat, rozsáhlým možnostem 3D geovizualizace a uživatelské přívětivosti. Kromě ArcGIS Pro nabízí Esri pro 3D vizualizaci ještě produkt ArcGIS Earth, který však poskytuje jen málo možností a je vhodný pouze pro rychlou práci s 3D daty a základní vizualizaci.

Hodnocení ArcGIS Pro z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 5
- podpora 3D geovizualizace: 5
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 5
- možnost vytvářet 3D aplikace: 5
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 5



Obr. 22: Vizualizace horizontální roviny v prostředí ArcGIS Pro

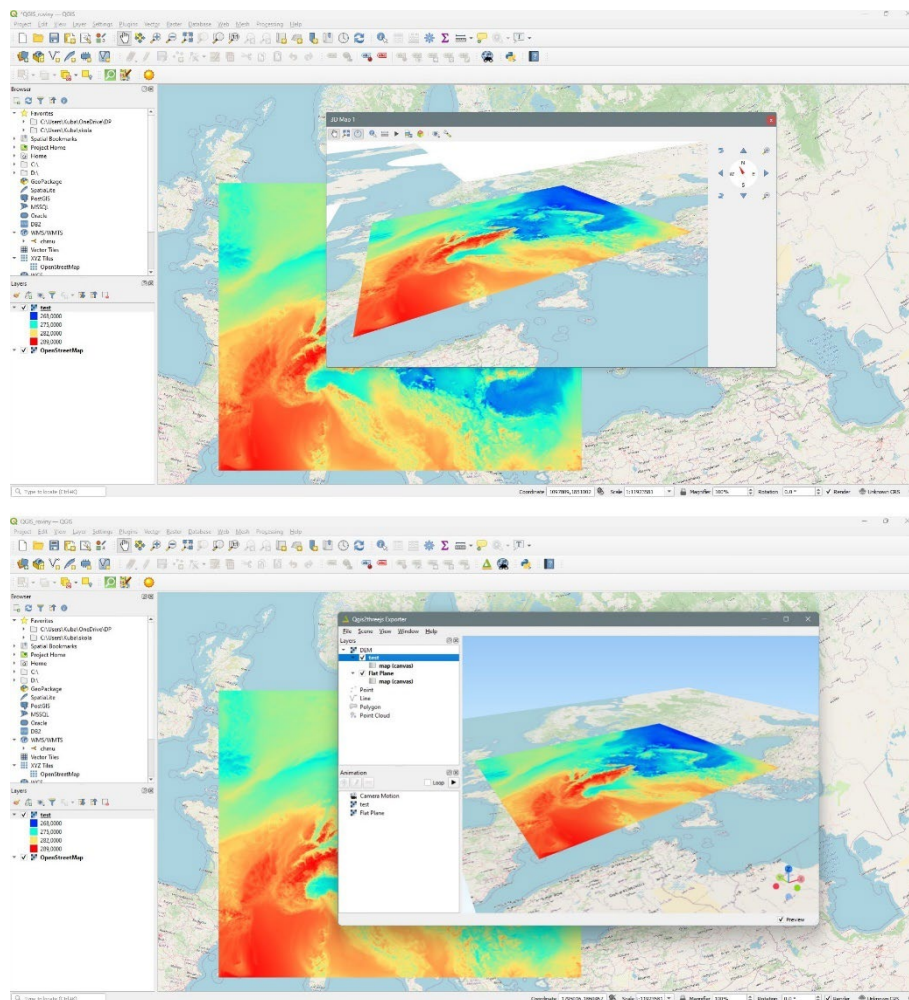
QGIS

QGIS je desktopový GIS spadající do kategorie tzv. **Free and Open-Source Software** (QGIS, 2023). Je dostupný pod licencí **GNU General Public License**, která jej umožňuje užívat i pro komerční účely. QGIS ke čtení, zápisu a konverzi vektorových a rastrových datových formátů používá otevřenou knihovnu **GDAL** (resp. GDAL/OGR). Umožňuje tedy práci s většinou používaných formátů prostorových dat. 3D vizualizace v QGIS zatím nedosahuje zdaleka takových kvalit, jako je tomu u ArcGIS Pro, což je samozřejmě způsobeno odlišnou filozofií obou programů. 3D vizualizace je v QGIS nativně podporována od verze 3.0 pomocí nástroje **3D Map View**. Vytvořená 3D scéna je provázána s 2D mapovým oknem – má stejný rozsah a vrstvy mají stejné nastavení znakového klíče. Kromě základních navigačních nástrojů (pan, zoom) jsou dostupné nástroje pro měření, tvorbu animací nebo export ve formě obrázku nebo 3D objektu (formát OBJ). V pokročilých možnostech lze nastavit **terén** (plochý, digitální model reliéfu), **osvětlení scény**, **stíny**, **parametry kamery a navigace** a další. Alternativní možností pro 3D vizualizace v QGIS je plugin **Qgis2threejs** (obr. 23). Ten však umožňuje velmi podobnou funkcionalitu, jako 3D Map View. V porovnání s ArcGIS Pro poskytuje QGIS jen **základní prostředí pro 3D vizualizace**, které je nevhodné pro pokročilé vizualizace trojrozměrných dat. QGIS se tedy pro vizuální analýzu 3D dat jeví jako nevhodný. Bylo by však pravděpodobně možné vytvořit plugin, který by požadovanou funkcionalitu umožňoval.

Hodnocení QGIS z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 5
- podpora 3D geovizualizace: 3
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 4

- možnost vytvářet 3D aplikace: 1
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 3,25



Obr. 23: Vizualizace horizontálních rovin v prostředí QGIS – 3D Map View (nahore) a plugin Qgis2threejs (dole)

5.3.2 Webová řešení

Webová řešení pro vizualizaci prostorových dat **zpravidla neposkytují tolik analytických možností**, jako klasický desktopový GIS. Jednou z **hlavních výhod** je ale schopnost **přístupovat k datům a nástrojům odkudkoliv a kdykoliv** prostřednictvím internetového prohlížeče. Webová řešení zároveň umožňují **snadnou distribuci geografických dat** prostřednictvím webových map, aplikací a 3D scén, takže uživatelé mohou rychle a efektivně sdílet informace s ostatními. Nevýhodami práce s prostorovými daty v prostředí webu jsou závislost na internetovém připojení, závislost na dostupnosti serverů, omezené možnosti přizpůsobení a omezené možnosti pro přenos velkých datových souborů.

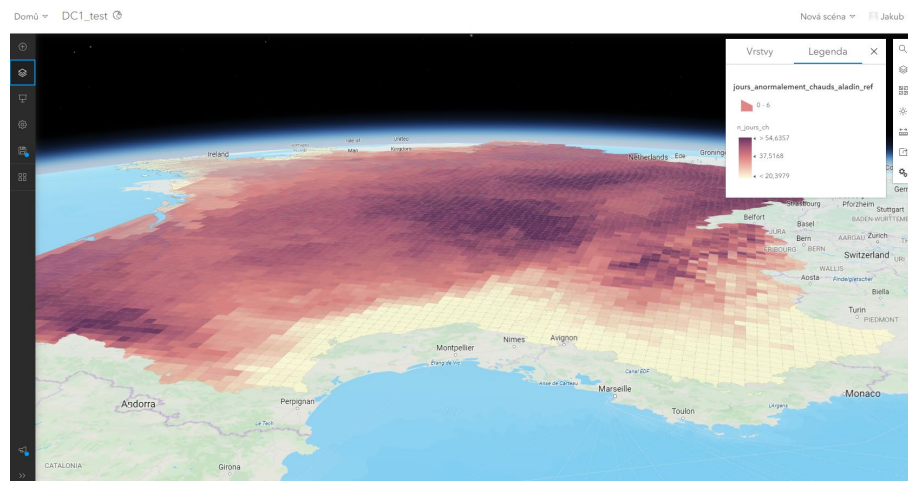
ArcGIS Online

ArcGIS Online je webová platforma vyvinutá společností Esri, která umožňuje uživatelům vytvářet, sdílet a analyzovat prostorová data. Stejně jako ArcGIS Pro je dostupný v rámci **komerční licence**. ArcGIS Online poskytuje funkce GIS v prostředí **cloudu**, což umožňuje uživatelům přistupovat ke geografickým datům a nástrojům odkudkoliv a kdykoliv, a zároveň eliminuje potřebu fyzické infrastruktury pro ukládání dat.

Veškeré procesy v případě ArcGIS Online probíhají **na straně serveru**, a jsou tedy závislé na internetovém připojení. Výkon na rozdíl od ArcGIS Pro není závislý na technických parametrech počítače. ArcGIS Online je tedy vhodnější z hlediska **sdílení, kolaborace a spolupráce v týmu**. ArcGIS Online podporuje širokou škálu formátů prostorových dat a 3D modelů (Esri, 2023f). Podporovaných formátů je ale podstatně méně, než u desktopového ArcGIS Pro. Vyskytl se problém s podporou rastrových dat, jelikož ArcGIS Online nepodporuje klasické formáty rastrových dat, ale pouze rastrová data publikovaná z ArcGIS Pro jako vrstvy dlaždic (Tile layer). Pro publikování rastrových dat z ArcGIS Pro je nutná extenze *Esri ArcGIS Image for ArcGIS Online*. Zároveň zde nejsou poskytovány takové možnosti vizualizace rastrových dat, jako je tomu u ArcGIS Pro, a práce s horizontálními rovinami je poměrně problematická (obr. 24). 3D scény lze vytvářet přímo v ArcGIS Online, nebo je sdílet z ArcGIS Pro a následně s nimi dále pracovat. Možnosti práce s 3D daty a podpora prostorových analytických funkcí jsou na srovnatelné úrovni, jako u ArcGIS Pro. Z vytvořených vizualizací lze pomocí ArcGIS Online jednoduše vytvářet 3D webové mapové aplikace. ArcGIS Online se pro 3D vizuální analýzu zdá spíše nevhodný, ale mohl by být použit například pro sdílení a prezentaci vytvořených vizualizací.

Hodnocení ArcGIS Online z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: **4**
- podpora 3D geovizualizace: **4**
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: **4**
- možnost vytvářet 3D aplikace: **5**
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: **4,25**



Obr. 24: Vizualizace horizontální roviny v prostředí ArcGIS Online

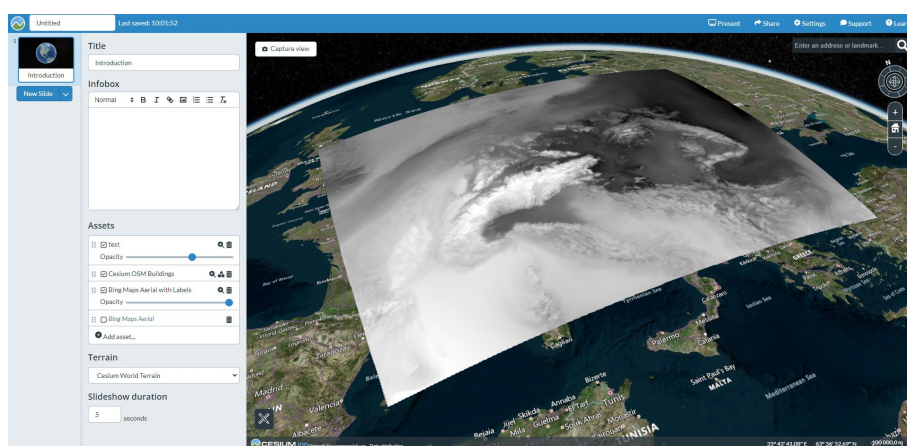
Cesium

Cesium je otevřená webová platforma pro vývoj 3D geoprostorových aplikací. Jejím cílem je tvorba 3D glóbulů a map pro statistický a časově dynamický obsah (Nétek a Burian, 2018). Cesium je postavené na strategii **freemium**. Základem je open-source **JavaScript knihovna**, která je volně dostupná pro nekomerční účely. Za pokročilejší funkce, jako je větší úložiště nebo rychlejší přenos dat, je ale potřeba zaplatit (Cesium GS, 2023a). Cesium podporuje asi dvacet datových formátů. Základní webová aplikace příliš možností 3D geovizualizace neposkytuje, **pokročilejší funkcionalitu lze ale naprogramovat** v jazyce JavaScript. Při vizualizaci horizontální roviny nebylo ve webovém prostředí Cesium možné

upravit znakový klíč nahraných dat (obr. 25). Zároveň aplikace neumožňuje nastavení vertikálního offsetu (výšky) vrstev. Z analytických funkcí je dostupné pouze měření. Cesium umožňuje poměrně snadno a rychle vytvářet 3D aplikace včetně animací, z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ale zdaleka nedosahuje takových kvalit, jako například ArcGIS Pro.

Hodnocení Cesium z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 4
- podpora 3D geovizualizace: 4
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 2
- možnost vytvářet 3D aplikace: 4
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 3,5



Obr. 25: Vizualizace horizontální roviny v prostředí Cesium

5.3.3 Programy pro počítačovou 3D grafiku

Programy pro počítačovou 3D grafiku (3D computer graphics, CGI – computer generated imagery) zatím nejsou pro geoinformatické úlohy příliš rozšířeny, a většina uživatelů dává přednost klasickým GIS. V některých případech, jako je například **vývoj aplikací** pro vizualizaci 3D dat, však poskytují tyto programy **daleko více možností**. Při práci s těmito programy je však zpravidla nutná poměrně **pokročilá znalost programování**. Největším problémem je ve většině případů interoperabilita, jelikož programy pro počítačovou 3D grafiku prostorové formáty nativně nepodporují. Existuje však řada rozšíření a pluginů, které práci s prostorovými daty umožňují.

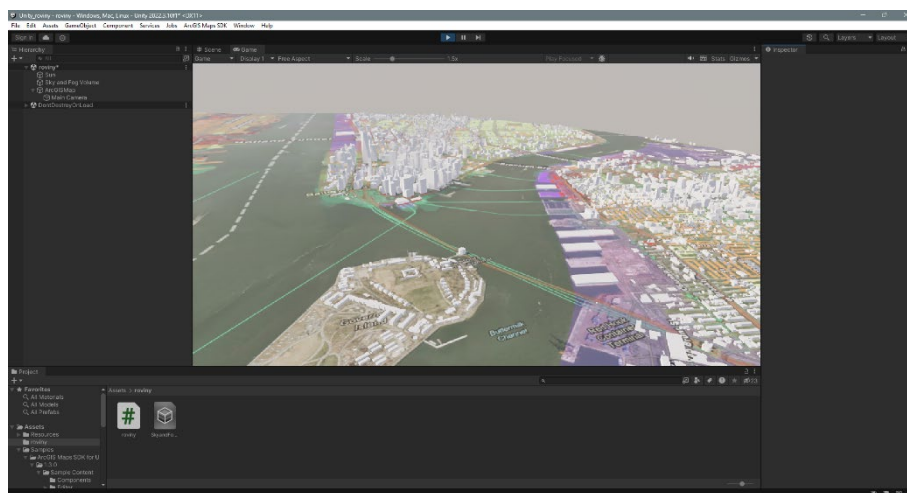
Počítačová 3D grafika se nejčastěji používá při tvorbě filmů, počítačových her nebo animací. Využití má ale i ve vědě (fyzika a matematika – počítačové simulace, medicína – 3D zobrazení orgánů a chirurgické plánování, chemie – vizualizace molekul a jejich interakcí). V současnosti se začínají například herní enginey využívat také v geoinformaticce, a to pro tvorbu realistických simulací geografických jevů (např. simulace povodní), tvorbu digitálních dvojčat, vytváření 3D scén pro virtuální realitu a další. Do programů pro počítačovou 3D grafiku lze zařadit také systémy CAD (computer aided design), které se používají zejména v architektuře a územním plánování.

Unity

Unity je integrované vývojové prostředí (IDE) a herní engine, který je široce využíván v průmyslu počítačových her a interaktivních vizuálních projektů. Tento software umožňuje vývojářům **kombinovat grafiku, zvuk a programování dohromady**, a usnadňuje tak tvorbu 2D i 3D her a aplikací. Jednou z klíčových vlastností Unity je jeho **multiplatformní podpora**, což znamená, že výsledné projekty lze snadno distribuovat na různé platformy, včetně počítačů, mobilních zařízení, herních konzolí a zařízení pro virtuální realitu. Pro jednotlivce a studenty je Unity zdarma, v případě firem je potřeba licenci platit. Existuje také varianta **Unity Pro**, která poskytuje pokročilejší funkcionalitu (Unity Technologies, 2023). Díky dostupnému API je možné funkcionalitu Unity libovolně rozšiřovat a je zde tedy velký potenciál pro podporu prostorových analytických funkcí a pokročilých 3D vizualizací. Interoperabilitu ArcGIS Pro a Unity umožňuje plugin **ArcGIS Maps SDK for Unity** (Esri, 2023a), díky kterému je možné data a vizualizace z ArcGIS Pro exportovat do prostředí Unity a využívat tak funkce herního enginu (obr. 26). Unity široce podporuje vytváření 3D aplikací, a to například i pro mobilní zařízení nebo virtuální realitu. Díky velmi dobré podpoře 3D vizualizací, možnosti uživatelského rozšíření funkcionality pomocí API a zejména možnosti propojení s ArcGIS Pro se Unity zdá jako velmi vhodný pro 3D vizuální analýzu.

Hodnocení Unity z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 5
- podpora 3D geovizualizace: 5
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 5
- možnost vytvářet 3D aplikace: 5
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 5



Obr. 26: Vizualizace horizontální roviny v prostředí Unity

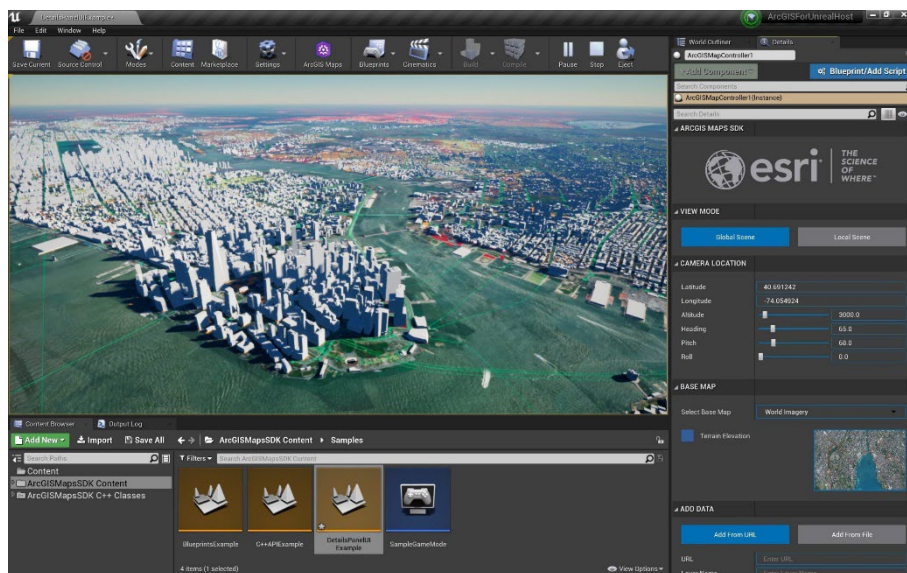
Unreal Engine

Unreal Engine je komplexní herní engine a vývojový framework, který se stal **klíčovým hráčem ve světě profesionálního vývoje** počítačových her a vizuálních projektů. Unreal Engine byl vyvinut společností Epic Games a nabízí širokou škálu nástrojů pro vývojáře, od pokročilých grafických možností a fyzikálního modelování po rozsáhlé **programování skriptů v jazyce C++**. Jednou z klíčových vlastností Unreal Engine je jeho **real-time rendering**, což umožňuje vývojářům okamžitě vidět výsledky své práce. Engine též nabízí rozsáhlou knihovnu předpřipravených aktiv a efektů, které vývojářům usnadňují vytváření

detailního a autentického prostředí. Unreal Engine podporuje širokou škálu platform, včetně PC, konzolí, mobilních zařízení a virtuální reality. Podobně jako u Unity je standardní licence Unreal Engine pro jednotlivce a studenty zdarma, v případě větších týmů je potřeba licenci platit (Epic Games, 2023). Propojení s ArcGIS Pro je podobně jako v případě Unity umožněno pluginem, a to konkrétně **ArcGIS Maps SDK for Unreal Engine** (Esri, 2023b). Dostupné možnosti pro 3D vizualizace a podpora prostorových analytických funkcí jsou podobně jako u Unity velmi široké, přičemž funkcionalitu je možné rozšiřovat pomocí C++ API. Unreal Engine umožňuje velmi pokročilé 3D vizualizace, rozšiřitelnou funkcionalitu a interoperabilitu s ArcGIS Pro, a z toho důvodu se jeví jako vhodný pro 3D vizuální analýzu (obr. 27).

Hodnocení Unreal Engine z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 5
- podpora 3D geovizualizace: 5
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 5
- možnost vytvářet 3D aplikace: 5
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 5



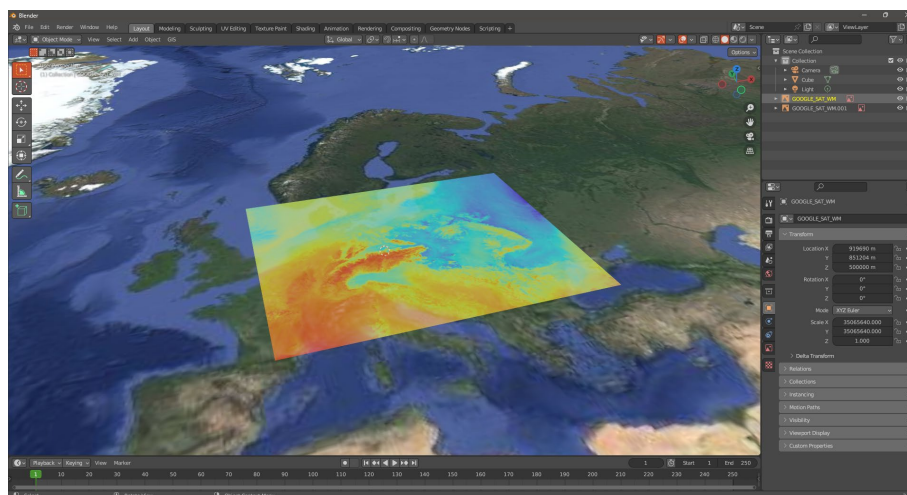
Obr. 27: Vizualizace horizontální roviny v prostředí Unreal Engine (zdroj: Hansen, 2020)

Blender

Blender je komplexní a výkonný **3D grafický software**, který nabízí širokou škálu funkcí pro modelování, texturování, animaci a renderování. Jedná se o open-source aplikaci s aktivní komunitou vývojářů. Podporu prostorových dat umožňuje **add-on BlenderGIS**, který umožňuje **import nejběžnějších GIS formátů** (např. shapefile, GeoTIFF, OSM). Zároveň je umožněno přidání vybraných podkladových map (např. od Google, Bing, Esri). Blender nepodporuje žádné prostorové analytické funkce a v případě prostorových dat je vhodný pouze pro vizualizaci (obr. 28). Pro vytváření 3D aplikací pomocí Blenderu je třeba poměrně pokročilá znalost programování. Blender není vhodný pro 3D vizuální analýzu prostorových dat. Ačkoliv je možné do jeho prostředí prostorová data naimportovat, práce s nimi je velmi omezená, a to i z důvodu podpory pouze několika formátů.

Hodnocení Blender z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D je následující:

- podpora prostorových dat: 3
- podpora 3D geovizualizace: 3
- podpora funkcí prostorové analýzy ve 3D: 1
- možnost vytvářet 3D aplikace: 3
- vhodnost vizuální analýzy ve 3D: 2,5



Obr. 28: Vizualizace horizontální roviny v prostředí Blender

5.3.4 Srovnání programů

Při hodnocení možností vizualizace horizontálních rovin ve 3D prostředí různých programů byla posuzována **čtyři kritéria** pomocí stupnice od 1 do 5, kde 1 představuje nejnižší hodnocení a 5 nejvyšší. **Průměrné skóre** napříč těmito kritérii odráží **celkovou vhodnost pro 3D vizuální analýzu** (tab. 10 a 11). Pro vizuální analýzu tematických dat ve 3D se jako nejvhodnější jeví **ArcGIS Pro**. Ten nabízí širokou podporu pro 3D data a poskytuje mnoho pokročilých funkcí pro jejich editaci, analýzu a vizualizaci. Mimo jiné umožňuje vytvořit realistický znakový klíč, tvorbu animací nebo přidání atmosférických efektů. Velkou výhodou je také kvalitní dokumentace. ArcGIS lze také kombinovat s herními enginy **Unity** a **Unreal Engine** a vytvářet tak vysoce pokročilé 3D vizualizace a interaktivní aplikace. Propojení ArcGIS s herními enginy umožňují **pluginy ArcGIS Maps SDK for Unity** a **ArcGIS Maps SDK for Unreal Engine**. Oba programy poskytují API, díky kterému je možné rozšiřovat jejich funkcionalitu. Na základě výsledků prvního dílčího cíle byl jako optimální program pro vizuální analýzu ve 3D, a tedy i pro další fáze disertační práce zvolen ArcGIS Pro, případně ArcGIS Online, který je zároveň možné propojit s herními enginy.

Tab. 10: Srovnání vybraných programů z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D (část 1/2)

program	typ	licence	podpora prostorových dat	podpora 3D vizualizací
ArcGIS Pro	desktop GIS	komerční	5	5
QGIS	desktop GIS	open-source	5	3
ArcGIS Online	webové řešení	komerční	4	4
Cesium	webové řešení	freemium	4	4
Unity	SW pro 3D grafiku	komerční (zdarma pro studenty)	5	5
Unreal Engine	SW pro 3D grafiku	komerční (základní verze zdarma)	5	5
Blender	SW pro 3D grafiku	open-source	3	5

Tab. 11: Srovnání vybraných programů z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D (část 2/2)

software	podpora 3D prostorových analytických funkcí	možnost vytváření 3D aplikací	vhodnost pro vizuální analýzu ve 3D	poznámka
ArcGIS Pro	5	5	5	pokročilé možnosti 3D vizualizace, široká podpora dat
QGIS	4	2	3,25	3D mapové okno, plugin Qgis2threejs, možnost vytvářet pluginy a skripty
ArcGIS Online	4	5	4,25	vhodné pro sdílení výstupů z ArcGIS Pro
Cesium	2	4	3,5	otevřený kód – možnost naprogramovat vlastní funkcionalitu
Unity	5	5	5	plugin ArcGIS Maps SDK for Unity
Unreal Engine	5	5	5	plugin ArcGIS Maps SDK for Unreal Engine
Blender	1	3	2,5	add-on BlenderGIS

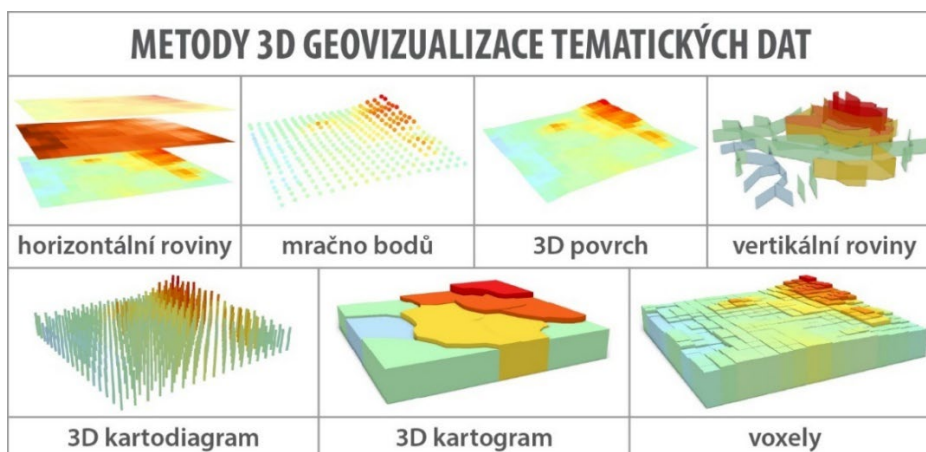
6 METODY 3D GEOVIZUALIZACE TEMATICKÝCH DAT

3D geovizualizace je v současné době **na vzestupu** a její popularita roste, a to zejména díky možnosti znázornit prostorová data přesně, poutavě a interaktivně. Výhodami a nevýhodami 3D geovizualizací se zabýval [Shepherd \(2008\)](#). Za výhody považuje např. **dodatečný zobrazovací prostor, možnost zobrazení více proměnných** nebo **řešení problému překrývajících se symbolů**. Mezi nevýhody naopak řadí např. proměnlivé měřítko napříč 3D scénami, zkreslení pohledu nebo problémy s průhledností a vrženými stíny. Mezi další nevýhody 3D geovizualizací může patřit také složitější zpracování dat, větší nároky na výpočetní výkon, omezená dostupnost 3D dat nebo problémy s interoperabilitou. [Vuckovic et al. \(2021\)](#) tvrdí, že v dnešní době narůstá potřeba kombinovat 2D a 3D vizualizace a jejich navigační a explorační techniky. Hodnocením použitelnosti a užitečnosti 3D geovizualizací z hlediska realističnosti a imerzivity se zabývali [Çöltekin et al. \(2016\)](#). Implementaci metod 3D geovizualizace tematických dat do prostředí Google Earth se ve své bakalářské práci věnoval [Havel \(2025\)](#).

Tato kapitola vychází z článku *Methods of 3D Geovisualization of Thematic Data in the Context of Graphic Variables* ([Zejdlik a Vozenilek, 2025](#)) a byla prezentována na 32. Mezinárodní kartografické konferenci (Vancouver, Kanada, 16.–22. srpna 2025).

6.1 Metody 3D geovizualizace ve formě 3D datových reprezentací

Existuje **mnoho způsobů a metod**, jak lze znázornit prostorová data v trojrozměrné podobě, nicméně **metody 3D geovizualizace tematických dat zatím nebyly v literatuře jasně definovány**. Některé metody jsou vhodné spíše pro topografická a výškopisná data, jiné jsou naopak vhodnější pro tematická data. Pro účely této práce bylo na základě bibliografické analýzy (kap. 3) a rešerše (kap. 4) vybráno pět nejčastěji používaných metod 3D geovizualizace tematických dat – **mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny, 3D kartodiagram** a **voxely**. Dále byla zahrnuta také metoda **3D kartogramu**, která se sice v literatuře příliš neobjevuje, ale přesto je velmi oblíbenou metodou 3D geovizualizace, a to zejména kvůli jednoduchosti provedení a interpretace. Často se používají také **horizontální roviny**, jimž je věnována kap. 5. Vzhledem k tomu, že je práce zaměřena primárně na rastrová data, byly vybrány pouze metody, které lze vytvořit z rastrových dat. Metody 3D geovizualizace, jimiž se zabývá tato práce, jsou graficky znázorněny na obrázku 29.



Obr. 29: Grafické znázornění sedmi vybraných metod 3D geovizualizace

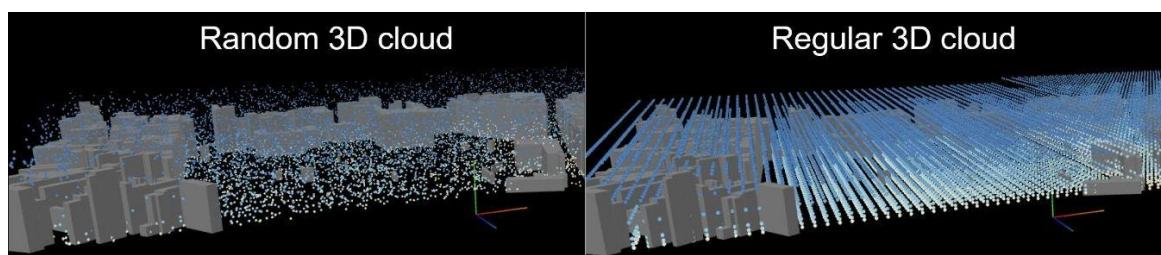
Dále byly identifikovány také následující metody: 3D linie, 3D šipky, space-time cube, 3D modely, virtuální glóbus, 3D mapa. Tyto další metody jsou stručně popsány na konci této podkapitoly, ale z hodnocení grafických proměnných byly vyřazeny, a to z následujících důvodů:

- **3D linie, 3D šipky, space-time cube:** tyto metody nejsou vhodné pro vizualizaci z rastrových dat poskytnutých ČHMÚ a pro jejich tvorbu by byla potřeba vektorová data ve formě bodů nebo linií,
- **3D modely:** jedná se například o 3D modely budov, které neslouží jako hlavní vyjadřovací metoda, ale jsou pouze vedlejším prvkem, který může v kombinaci s jinými metodami dodat vizualizaci na realističnosti,
- **virtuální glóbus, 3D mapa:** nejedná se o metody 3D geovizualizace jako takové, ale spíše o prostředí, ve kterém jsou jiné vizualizace umístěny.

Obdobně jako v případě horizontálních rovin (kap. 5), byly i u dalších šesti metod 3D geovizualizace **hodnoceny grafické proměnné** z hlediska **významnosti** na škále 1 až 5 (1 – nevýznamná, 5 – velmi významná). Celkem bylo sledováno **16 proměnných**, přičemž u některých metod se některé proměnné neuplatňují.

6.1.1 Mračno bodů (Point Cloud)

Mračno bodů je typ **diskrétní vizualizace**, kdy je každý bod reprezentován třemi souřadnicemi. Může se jednat o **2D bodové mračno**, kdy mají všechny body konstantní Z souřadnici, nebo o **3D bodové mračno**, kdy je Z souřadnice proměnlivá. Body mračna mohou být rozmístěny náhodně, nebo v pravidelné mřížce (obr. 30). V ideálním případě má uživatel možnost dynamicky měnit velikost a hustotu bodů, aby bylo dosaženo co nejlepší vizuální analýzy (Gautier et al., 2020b).



Obr. 30: 3D geovizualizace meteorologických dat pomocí mračna bodů (zdroj: Christophe et al., 2022)

Hodnocení grafických proměnných pro metodu „mračno bodů“ je znázorněno v tabulce 12. U této metody se neuplatňují tři grafické proměnné: **orientace** (body mají ve všech případech stejnou orientaci), **rozlišení** (jedná se o vizualizaci z vektorových dat) a **extruze** (velikost bodu je definována jeho průměrem, nikoliv extruzí).

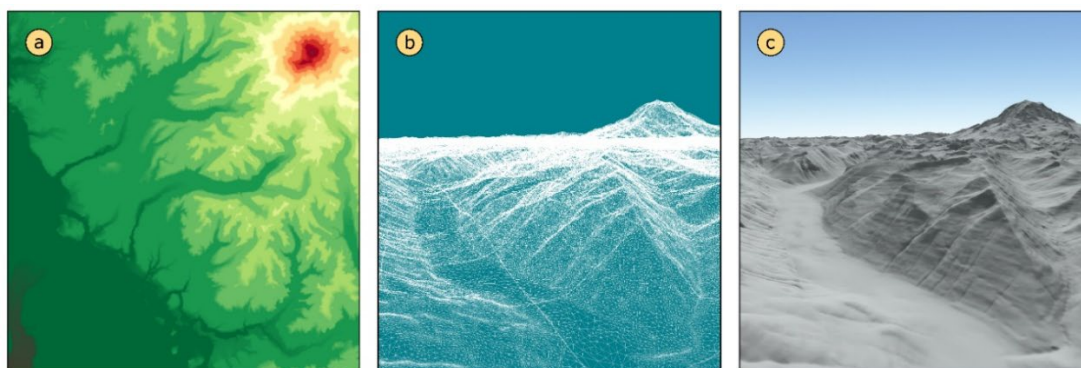
Tab. 12: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „mračno bodů“

mračno bodů (Point Cloud)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
poloha	2	Poloha všech bodů v bodovém mračnu je předem definována, přičemž body mohou být rozmístěny pravidelně nebo nepravidelně.
velikost	4	Velikost bodů je potřeba vhodně nastavit s ohledem na měřítko, jelikož v případě příliš velkých bodů by mohlo dojít k jejich výraznému překrývání, a v případě příliš malých bodů by bylo obtížné určit například barvu bodu.

tvár	1	Body v bodovém mračnu mají vždy sférický tvar.
jas barvy	5	Barva hraje v případě bodového mračna významnou roli, jelikož body mohou být obarveny na základě vybraného atributu, což může výrazně zlepšit uživatelskou interpretaci. V kombinaci například s výškou mohou obě proměnné znázorňovat buď stejný atribut, nebo různé atributy, a znázornit tak více proměnných v rámci jedné vizualizace.
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
textura/vzor	1	Na body je možné aplikovat texturu nebo vzor, ale vhodnější je použití pouze barvy, jelikož textura nebo vzor jsou v případě malých bodů velmi špatně rozlišitelné.
uspořádání	5	Body mohou být uspořádány buď pravidelně (v pravidelné mřížce s konstantní vzdáleností mezi body) nebo nepravidelně (například náhodně).
nejistota	3	Nejistotu lze v případě bodového mračna znázornit pomocí dalších grafických proměnných, např. průhledností (čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota) nebo velikostí (čím menší bod, tím větší nejistota).
průhlednost	2	Na body lze aplikovat průhlednost, což může částečně vyřešit překryv bodů, ale může poté docházet ke splývání barev a horší interpretaci.
výška	5	Všechny body mohou být umístěny ve stejné výšce, nebo může být výška proměnlivá na základě vybraného atributu. Lze také zobrazit více bodových mračen nad sebou.
kamera	4	Pro kvalitní interpretaci je nutné zajistit interaktivní ovládání kamery, aby bylo možné prozkoumat všechny části bodového mračna, jelikož se body mohou často překrývat.
perspektiva	2	Mračno bodů může být vykresleno v rovině nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.2 3D povrch (3D Surface)

3D povrch je metoda **spojité vizualizace** vznikající zpravidla interpolací bodů z bodového mračna. Na rozdíl od horizontálních rovin nemá každá buňka konstantní Z souřadnici, ale **výška buněk je proměnlivá** v závislosti na hodnotě jevu. 3D povrchy se používají nejčastěji pro vyjádření **výškopisu** (digitální modely terénu – obr. 31), ale lze je využít například i pro reprezentaci **socioekonomických jevů** (tzv. sociální povrchy). Sociálním povrchům se věnovala například Stískalová (2017). Socioekonomická data mají jiné charakteristiky než data fyzickogeografická. Nestačí tedy používat stejné metody a jen měnit data. Vždy je nutné znát zkoumaný jev a přizpůsobit mu způsob vizualizace (Jakobi a Nemes Nagy, 2006).



Obr. 31: 3D povrch je obvykle založen na výškových datech (a), z nichž jsou zpravidla generovány trojúhelníkové sítě (b), a následně je vykreslen finální model (c) (zdroj: Dübel a Schumann 2017).

Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D povrch“ je znázorněno v tabulce 13. U této metody se neuplatňuje šest grafických proměnných. Čtyři z nich jsou definované charakterem zdrojových dat,

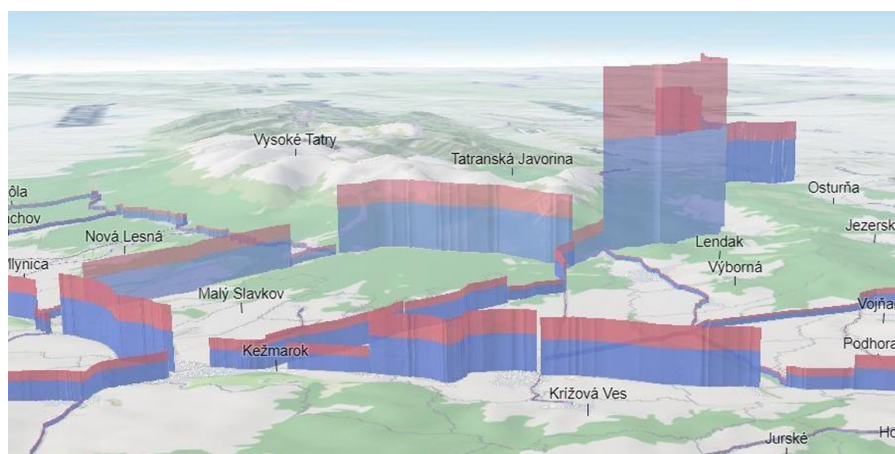
a nelze je tedy nějak upravovat. Jedná se o: **polohu** (umístění 3D povrchu v prostoru), **velikost** (prostorový rozsah dat), **tvar** (v závislosti na zdrojových datech – 3D povrch může vycházet jak z obdélníkového rastru, tak z rastru, který je například oříznutý podle hranic států) a **orientaci** (definovaná orientací zdrojového rastru). Dalšími dvěma proměnnými, které se u 3D povrchů neuplatňují, jsou **textura/vzor** (na pixely nelze aplikovat texturu nebo vzor, ale pouze barvu) a **extruze** (u 3D povrchu je třetí rozměr reprezentován výškou pixelu, nikoliv extruzí).

Tab. 13: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D povrch“

3D povrch (3D Surface)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Barva jednotlivých buněk 3D povrchu je velmi důležitá, jelikož díky ní má uživatel odečíst přesné, nebo alespoň přibližné hodnoty buněk. Při použití pouze jedné barvy pro celý povrch by se uživatel musel spolehnout jen na odhad hodnot na základě výšky buněk.
tón barvy	5	
sytnost barvy	5	
uspořádání	2	V případě vizualizace více povrchů nad sebou platí podobná tvrzení, jako pro vizualizaci více horizontálních rovin. Při zobrazení více povrchů v rámci jedné vizualizace by měly být povrchy logicky uspořádány podle vybraných atributů. V případě 3D povrchu se ale spíše předpokládá použití pouze jednoho povrchu v rámci jedné vizualizace.
nejistota	3	Nejistotu lze znázornit například jasnou barvou nebo průhledností (např. čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota).
rozlišení	4	Rozlišení (velikost pixelu) ovlivňuje zrnitost výsledného obrazu – vysoké rozlišení znamená podrobnější a plynulejší vizualizaci, což má ale za důsledek větší objem dat.
průhlednost	3	Pro průhlednost u 3D povrchu platí podobná tvrzení, jako u jedné horizontální roviny. Průhlednost umožňuje částečnou viditelnost topografického podkladu (např. hranice států, města). Při špatném nastavení může ale průhlednost zkreslovat vizualizaci z důvodu prolínání barev tematické vrstvy a podkladu.
výška	5	U 3D povrchu je výška buněk (Z souřadnice) proměnlivá na základě hodnoty (například teplota – čím vyšší teplota, tím výše je daná buňka v rámci vizualizace).
kamera	4	Pro kvalitní interpretaci je nutné zajistit interaktivní ovládání kamery, aby bylo možné prozkoumat všechny části 3D povrchu, jelikož některé části povrchu mohou překrývat jiné.
perspektiva	2	3D povrch může být vykreslen bez nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.3 Vertikální roviny (Vertical Planes)

Kromě horizontálních rovin lze tematická data reprezentovat také **vertikálními rovinami** (obr. 32). Roviny jsou zpravidla umístěny uprostřed městských komunikací a jsou vykresleny **vertikálním vytlačením lineární geometrie silniční sítě**. Výška rovin může být proměnlivá na základě hodnoty jevu, nebo může být výška konstantní, přičemž se na základě hodnoty jevu mění například barva. Aby bylo možné reagovat na případné problémy s okluzí, lze na svislé roviny aplikovat **průhlednost** (Gautier et al., 2020a). Jedlička et al. (2024) metodu označují jako 3D Flow Map (3D stuhový kartodiagram). Ta je podle nich založena na stuhovém kartodiagramu – metodě tematické kartografie používané k vyjádření lineárního jevu s kvantitativními nebo kvalitativními atributy.



Obr. 32: 3D geovizualizace intenzity dopravy pomocí vertikálních rovin – barva linie určuje kategorii vozidla, extruze linie odpovídá počtu vozidel (zdroj: Jedlička et al., 2024)

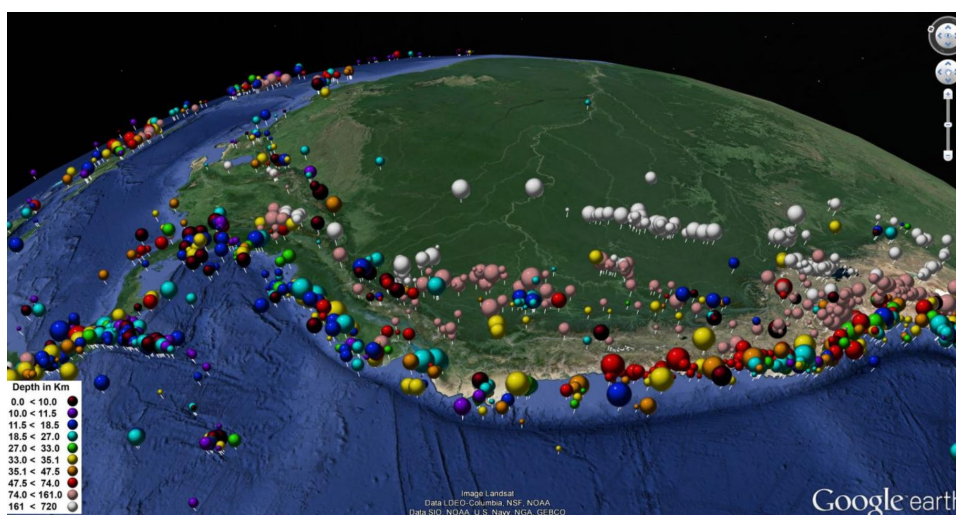
Hodnocení grafických proměnných pro metodu „vertikální roviny“ je znázorněno v tabulce 14. U této metody se neuplatňuje šest grafických proměnných: **poloha** (definována zdrojovými liniovými daty – např. silniční sítě, vrstevnice), **velikost** (délka linie, přičemž vertikální dimenze je určena extruzí), **tvar** (vždy linie), **orientace** (definovaná orientací linie), **uspořádání** (definováno zdrojovými liniovými daty) a **rozlišení** (jedná se o vizualizaci z vektorových dat).

Tab. 14: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „vertikální roviny“

vertikální roviny (Vertical Planes)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Vertikální roviny mohou být obarveny kvalitativně (například podle typu silnice, přičemž kvantita je reprezentována například extruzí) nebo kvantitativně (kde intenzita barvy odpovídá hodnotě daného jevu). Barva a extruze mohou znázorňovat stejné nebo různé atributy.
tón barvy	5	
sytnost barvy	5	
textura/vzor	3	Použití textury nebo vzoru na vertikální roviny může obohatit vizualizaci o další kvalitativní či kvantitativní informace. Prioritně by ale měly být použity významnější proměnné, jako je barva nebo extruze.
nejistota	3	Nejistotu lze v případě vertikálních rovin znázornit pomocí dalších grafických proměnných, např. průhledností (čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota) nebo extruzí (čím nižší rovina, tím větší nejistota).
průhlednost	2	Na roviny lze aplikovat průhlednost, což může částečně vyřešit jejich překryv, ale může docházet ke splývání barev a horší interpretaci.
výška	2	Vertikální roviny by měly být umístěny na zemi, jelikož často vychází např. ze silniční sítě nebo vrstevnic. V případě zobrazení více rovin nad sebou mohou na sebe roviny navazovat, nebo mít mezi sebou mezeru.
extruze	5	Extruze určuje vertikální dimenzi roviny, přičemž může být proměnlivá na základě hodnoty jevu. Extruze může být také u všech rovin konstantní, přičemž se mění jiné proměnné (například barva).
kamera	4	Podobně jako u jiných metod může při vizualizaci metodou vertikálních rovin docházet k jejich překryvu, a je tedy důležité zajistit interaktivní ovládání kamery.
perspektiva	2	Vertikální roviny mohou být vykresleny bez nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.4 3D kartodiagram (3D Graduated Symbols)

3D kartodiagram může mít mnoho podob. Vychází z klasické metody kartodiagramu používané v tematických mapách. Může se jednat například o 3D sloupcový diagram, výsečový diagram nebo bodový kartodiagram (obr. 33), přičemž velikost těchto prvků je závislá na hodnotě dat (např. výška sloupce, průměr sféry). Testováním vhodných reprezentací kvantitativních prostorových dat ve 3D virtuálních prostředích pomocí 3D kartogramů se zabývala Bleisch (2011). Testováno bylo celkem šest metod: 2D sloupce, 2D kruhové bodové znaky, 3D sloupce a varianty těchto metod s referenčními rámci, které uvádějí největší možné hodnoty. Interpretace kruhových znaků není tak obtížná, jak se očekávalo, ale 2D a 3D sloupce poskytují přesnější výsledky s menšími odchylkami. Interpretace všech tří nastavení s referenčními rámy trvá déle než u jejich protějšků bez referenčních ráků. Rozdíl v přesnosti je méně zřejmý (Bleisch, 2011). Stoter et al. (2008) použili 3D kartodiagram pro vizualizaci hladiny hluku pomocí tzv. virtuálních mikrofonů. Virtuální mikrofon, specifikovaný souřadnicemi X, Y a Z je bod, který udává, jaká by byla hladina hluku v určitém místě za daných okolností.



Obr. 33: 3D geovizualizace zemětřesení pomocí 3D kartodiagramů (zdroj: Ziolkowska a Reyes, 2016)

Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D kartodiagram“ je znázorněno v tabulce 15. U této metody se neuplatňuje grafická proměnná **rozlišení**, jelikož se jedná o vizualizaci z vektorových dat.

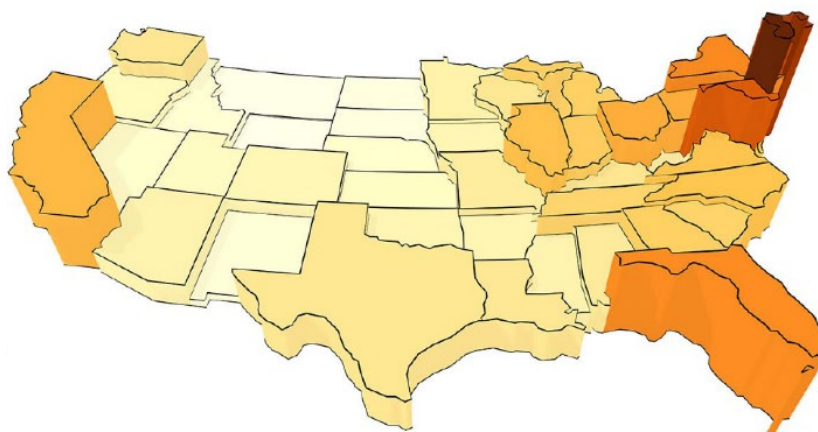
Tab. 15: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D kartodiagram“

3D kartodiagram (3D Graduated Symbols)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
poloha	4	3D kartodiagramy mohou být umístěny pravidelně (v pravidelné mřížce) nebo nepravidelně (například jeden diagram pro jeden stát).
velikost	5	Velikost 3D kartodiagramů je velmi důležitou proměnnou, jelikož reprezentuje hodnoty prvků (např. výška sloupce, průměr kruhu). Vyšší hodnoty by tedy měly být znázorněny vyššími sloupci apod.
tvar	5	Diagramy mohou mít různý tvar, přičemž se může jednat o 2D (např. kruhy, sloupce) nebo 3D objekty (např. sféry, krychle, válce, jehlany). Podle tvaru lze 3D kartodiagramy dělit na bodové (např. kruhy, sféry), sloupcové (např. sloupce, válce) a ostatní (např. strukturní, výsečový). Specifickým případem kartodiagramu může být např. meteogram, větrná růžice nebo věková pyramida.

jas barvy	5	Podobně jako u dalších metod hraje barva i v případě 3D kartodiagramu významnou roli. Barva diagramů v kombinaci s jejich velikostí (průměr, výška, extruze, ...) zvyšuje uživatelskou přívětivost a schopnost správné interpretace.
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
orientace	3	Orientace závisí na typu diagramu. Například u sférického bodového diagramu se orientace neuplatňuje, jelikož sféry mají vždy stejnou orientaci, ale při použití kvádrů jako bodového kartodiagramu může být orientace významná.
textura/vzor	3	Použití textury a vzoru závisí na typu diagramu. U malých diagramů by mohla být textura/vzor málo čitelné. Obecně ale může použití textury/vzoru obohatit vizualizaci o další kvalitativní či kvantitativní informace.
uspořádání	5	Kartodiagramy mohou být uspořádány pravidelně nebo nepravidelně.
nejistota	3	Nejistotu lze v případě 3D kartodiagramu znázornit například pomocí průhlednosti (čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota) nebo textury/vzoru.
průhlednost	2	Na diagramy lze aplikovat průhlednost, což může částečně vyřešit jejich překryv, ale může docházet ke splývání barev a horší interpretaci.
výška	5	Diagramy mohou být buď umístěny v určité výšce nad zemí, přičemž se mění jejich velikost (např. průměr sféry) nebo mohou být umístěny na zemi, a hodnoty jsou znázorněny různou extruzí (např. výška sloupce).
extruze	5	Extruze se uplatňuje u sloupcových kartodiagramů, přičemž velikost extruze (výška) reprezentuje hodnoty prvků.
kamera	4	Podobně jako u jiných metod může při vizualizaci metodou 3D kartodiagramu docházet k překryvu diagramů, a je tedy důležité zajistit interaktivní ovládání kamery.
perspektiva	2	3D kartodiagramy mohou být vykresleny bez nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.5 3D kartogram (Prism Map)

3D kartogram vychází z klasické metody kartogramu, přičemž je výška **extrudována** pro znázornění **číselného atributu** (obr. 34). 3D kartogramy se používají převážně kvůli **vizuální atraktivitě**, ale jejich neznalost může bránit jejich pochopení uživateli (Field, 2018). **Extruze** (vizuální proměnná používaná 3D kartogramy) **je mnohem přesnější** pro interpretaci souvisejících kvantitativních hodnot **než jas** (vizuální proměnná běžně používaná na 2D kartogramech), ale perspektiva a šikmé pozorovací úhly mohou u 3D kartogramů vést ke **zkreslení** a **nadměrné okluzi** (Cleveland a McGill, 1984).



Obr. 34: 3D geovizualizace hustoty zalidnění ve státech USA pomocí 3D kartogramu
(zdroj: Yang et al., 2020)

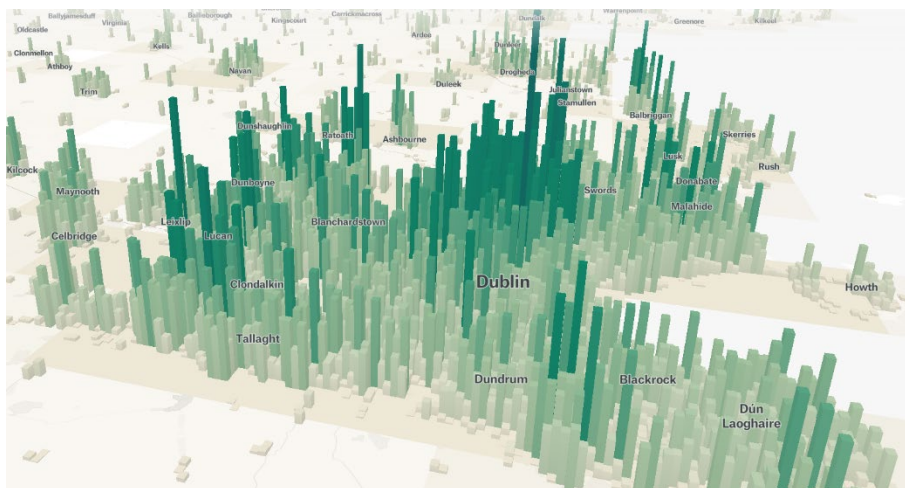
Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D kartogram“ je znázorněno v tabulce 16. U této metody se neuplatňuje šest grafických proměnných: **poloha**, **velikost**, **tvár**, **orientace**, **uspořádání** (dané zdrojovými daty územních jednotek – např. státy, regiony) a **rozištění** (jedná se o vizualizaci z vektorových dat).

Tab. 16: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „3D kartogram“

3D kartogram (Prism Map)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
jas barvy	5	Podobně jako u dalších metod hraje barva v případě 3D kartogramu významnou roli. Může být kombinována s dalšími proměnnými (zejména textura/vzor a extruze), přičemž mohou tyto proměnné vyjadřovat stejný atribut, nebo mohou být např. barvou a výškou znázorněny různé atributy.
tón barvy	5	
sytost barvy	5	
textura/vzor	4	Textura a vzor mohou obohatit vizualizaci o další kvalitativní či kvantitativní informace. Prioritně by ale měly být použity významnější proměnné, jako je barva nebo extruze.
nejistota	3	Nejistotu lze v případě 3D kartogramu znázornit například pomocí průhlednosti (čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota), barvy nebo textury/vzoru.
průhlednost	1	Použití průhlednosti v případě 3D kartogramu je spíše nevhodné, jelikož jednotlivé územní jednotky na sebe zpravidla navazují, a průhlednost by mohla zhoršit interpretaci použitých barev a extruze.
výška	2	3D kartogram by měl být umístěn na zemi, jelikož zpravidla vychází například z administrativních jednotek. Umístění 3D kartogramu v určité výšce však může umožnit viditelnost topografického podkladu.
extruze	5	Extruze určuje vertikální dimenzi územních jednotek, přičemž velikost extruze (výška) reprezentuje hodnoty prvků.
kamera	3	V případě 3D kartogramu nedochází k tak výraznému překryvu jako u jiných metod. Přesto je vhodné umožnit interaktivní ovládání kamery.
perspektiva	2	3D kartogram může být vykreslen bez nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.6 Voxely (Voxels)

Při geovizualizaci pomocí **voxelů** jsou data reprezentována **bloky s různými výškami** v závislosti na jejich hodnotě (obr. 35). Má tedy společné prvky se sloupcovým 3D kartodiagramem a kartogramem. Na rozdíl od 3D kartodiagramu na sebe ale v případě voxelů **sousední bloky** (sloupce) **vzájemně navazují**, a na rozdíl od 3D kartogramu mají **všechny polygony konstantní velikost**. Rae (2016) použil data *The Global Human Settlement Layer* k reprezentaci populace ve vybraných městech pomocí voxelů (Rae, 2016). Jeho přístup byl aplikován v roce 2018 společností The Pudding k vytvoření interaktivní webové mapové aplikace využívající stejný datový soubor k reprezentaci populace pomocí voxelů pro celý svět (The Pudding, 2024).



Obr. 35: 3D geovizualizace hustoty zalidnění v Dublinu pomocí voxelů (zdroj: The Pudding, 2024)

Hodnocení grafických proměnných pro metodu „Voxely“ je znázorněno v tabulce 17. U této metody se neuplatňuje pět grafických proměnných: **poloha**, **orientace** (definovány zdrojovou čtvercovou sítí), **tvar** (vždy kvádr), **uspořádání** (voxely vždy vychází z pravidelné čtvercové sítě) a **rozlišení** (jedná se o vizualizaci z vektorových dat).

Tab. 17: Hodnocení grafických proměnných pro metodu „Voxely“

Voxely (Voxels)		
grafická proměnná	významnost	poznámka
velikost	5	Velikost je v případě voxelů ekvivalentem rozlišení, jelikož velikost voxelu ovlivňuje podrobnost výsledné vizualizace.
jas barvy	5	Barva hraje v případě voxelů významnou roli, přičemž je vhodné barvu kombinovat zejména s extruzí. Obě proměnné mohou vyjadřovat stejný atribut, nebo mohou být barvou a extruzí znázorněny různé atributy.
tón barvy	5	
sytnost barvy	5	
textura/vzor	2	Textura a vzor mohou obohatit vizualizaci o další kvalitativní či kvantitativní informace. V případě malé velikosti voxelů ale mohou být textura nebo vzor špatně rozlišitelné.
nejistota	3	Nejistotu lze v případě voxelů znázornit například pomocí průhlednosti (čím větší průhlednost, tím vyšší nejistota), barvy nebo textury/vzoru.
průhlednost	1	Použití průhlednosti je v případě voxelů je nevhodné, jelikož jednotlivé voxely na sebe zpravidla navazují, a průhlednost by mohla zhoršit interpretaci použitých barev a extruze.
výška	2	Podobně jako v případě 3D kartogramu by měly být voxely umístěny na zemi. Umístění voxelů v určité výšce však může umožnit viditelnost topografického podkladu.
extruze	5	Extruze určuje vertikální dimenzi voxelů, přičemž velikost extruze (výška) reprezentuje hodnoty prvků.
kamera	3	V případě voxelů nedochází k tak výraznému překryvu jako u jiných metod. Přesto je vhodné umožnit interaktivní ovládání kamery.
perspektiva	2	Voxely mohou být vykresleny bez nebo se zohledněním zakřivení Země v závislosti na měřítku a účelu vizualizace.

6.1.7 Srovnání metod

U žádné ze šesti metod se neuplatňuje všech 16 grafických proměnných. Nejvíce proměnných (15) se uplatňuje u metody **3D kartodiagram**. Podobně jako v případě horizontálních rovin jsou napříč všemi metodami nejvýznamnějšími grafickými proměnnými **jas, tón a sytost barvy**. Barva umožňuje udělat vizualizace uživatelsky atraktivní a snadno interpretovatelné. Další velmi významnou proměnnou je **extruze**, která se neuplatňuje pouze u mračna bodů a 3D povrchu. **Výška** je pro tři metody velmi významná a pro zbylé tři metody spíše nevýznamná. Kombinace více proměnných (např. barva a výška, barva a extruze) může v případě znázornění stejného atributu pomoci ke správné interpretaci (např. voxely – teplota vzduchu je znázorněna jak extruzí voxelu, tak jeho barvou) nebo v případě znázornění různých atributů umožnit komplexní vizualizaci (např. vertikální roviny – teplota vzduchu je znázorněna barvou roviny, relativní vlhkost je znázorněna extruzí roviny). **Orientaci** je možné sledovat jen u 3D kartodiagramů, které nemají sférickou podobu (např. kvádry, jehly). **Rozlišení** je možné sledovat pouze u **3D povrchů**, jelikož se jedná o vizualizaci z rastrových dat. **Nejistota, kamera a perspektiva** mají podobné hodnoty významnosti napříč všemi metodami (tab. 18). Přestože toto expertní posouzení vychází primárně z autorovy syntézy poznatků, jeho validita byla průběžně konfrontována se školitelem a kolegy z oboru kartografie, díky čemuž plně reflektuje zavedené principy olomoucké kartografické školy. Definitivní objektivizace těchto teoretických předpokladů je následně realizována empiricky pomocí uživatelského testování v dalších částech práce.

Tab. 18: Porovnání metod 3D geovizualizace z hlediska významnosti grafických proměnných

grafická proměnná	významnost					
	mračno bodů	3D povrch	vertikální roviny	3D kartodiagram	3D kartogram	voxely
poloha	2	-	-	4	-	-
velikost	4	-	-	5	-	5
tvar	1	-	-	5	-	-
jas barvy	5	5	5	5	5	5
tón barvy	5	5	5	5	5	5
sytost barvy	5	5	5	5	5	5
orientace	-	-	-	3	-	-
textura/vzor	1	-	3	3	4	2
uspořádání	5	2	-	5	-	-
nejistota	3	3	3	3	3	3
rozlišení	-	4	-	-	-	-
průhlednost	2	3	2	2	1	1
výška	5	5	2	5	2	2
extruze	-	-	5	5	5	5
kamera	4	4	4	4	3	3
perspektiva	2	2	2	2	2	2

6.1.8 Další metody 3D geovizualizace

Kromě sedmi metod 3D geovizualizace, které byly výše popsány a zhodnoceny z hlediska grafických proměnných, **byly identifikovány také další metody**, jejichž definice jsou následující:

- **3D linie (3D Flow Maps):** forma liniové 3D geovizualizace pohybových dat (např. migrace obyvatelstva, intenzita dopravy) pomocí trojrozměrných linií, které zahrnují informace např. o rychlosti a směru pohybu, přičemž tloušťka či barva linií může symbolizovat např. intenzitu nebo objem, a třetí rozměr může zobrazovat například nadmořskou výšku (Yang et al., 2018),
- **3D šipky:** forma liniové 3D geovizualizace pohybových dat (např. rychlost větru); 3D šipky kombinují několik proměnných – např. barva, orientace, velikost hrotu nebo délka či tloušťka linie (An et al., 2014),
- **space-time cube (STC):** trojrozměrné vizualizační prostředí, jehož základna představuje dvourozměrný geografický prostor a výška představuje časovou dimenzi; může současně reprezentovat prostorovou distribuci i časové změny časoprostorových dat (Song et al., 2021),
- **3D model:** digitální reprezentace povrchu Země nebo objektů na něm; tyto modely mohou představovat prvky vytvořené člověkem, jako jsou budovy a mosty, nebo přírodní prvky, jako je terén nebo vodní plochy (Atlas, 2024),
- **virtuální glóbus:** 3D prostředí umožňující uživatelům procházet a vyhledávat data promítaná na interaktivní digitální model Země nebo jiného tělesa (Ziolkowska a Reyes, 2016),
- **3D mapa:** digitální, matematicky definovaná, trojrozměrná virtuální reprezentace Země, povrchů, objektů a přírodních a společenských jevů; znázorněné objekty a jevy jsou klasifikovány, navrženy a vizualizovány podle konkrétního účelu (Bandrova, 2016).

6.2 Postup tvorby 3D geovizualizací z rastrových dat v ArcGIS Pro

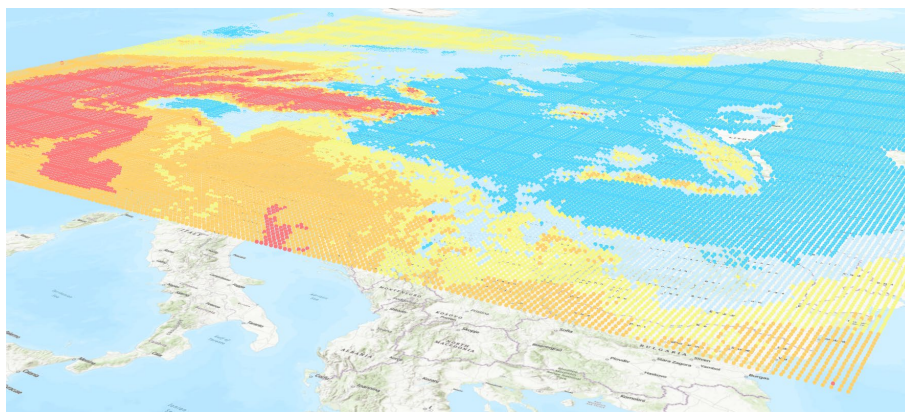
V této podkapitole je popsán **postup tvorby šesti výše definovaných metod** 3D geovizualizace v prostředí programu ArcGIS Pro. Pro ukázkové vizualizace byla použita rastrová vrstva předpovědního modelu ALADIN znázorňující teplotu 1. ledna 2014 v 00:00.

Mračno bodů

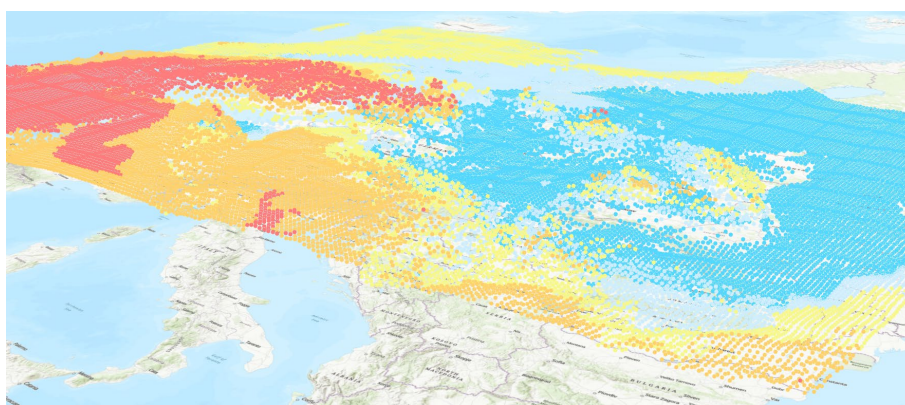
Pro tvorbu **mračna bodů** z rastrových dat je nejprve potřeba stanovit, zda má být bodové mračno pravidelné či nepravidelné. Pro tvorbu pravidelného bodového mračna je v první fázi třeba vytvořit **pravidelnou čtvercovou mřížku** (grid) pomocí nástroje *Generate Tesselation* a vhodně zvolit **velikost buňky** (např. 100 km²). Z mřížky lze pak nástrojem *Feature to Point* vytvořit centroidy jednotlivých buněk, čímž vznikne pravidelné bodové mračno. Nepravidelnou mřížku lze vytvořit díky nástroji *Create Random Points*, kde je možné nastavit **počet bodů** a **minimální povolenou vzdálenost**. Takto vytvořené bodové vrstvy však zatím neobsahují informaci o hodnotách z rastru. Tu je možné doplnit nástrojem *Extract Values to Points*, kdy je každému bodu přiřazena hodnota na základě prostorově odpovídající buňky rastru. Poté je možné upravit **znakový klíč** (*Symbolology*) bodového mračna (např. klasifikované intervaly, spojitá stupnice) a v rámci scény jej přesunout mezi 3D vrstvy.

Bodové mračno lze znázornit ve dvou variantách – všechny body **ve stejné výškové úrovni** (podobně jako horizontální roviny) nebo **s proměnlivou výškou bodů** na základě jejich hodnoty (podobně jako 3D povrch). V obou případech je třeba přejít do nastavení vrstvy (*Properties*) a následně na podzáložku *Elevation*. Pro zobrazení všech bodů ve stejné výšce (obr. 36) je nutné zvolit *Features are: On the ground*

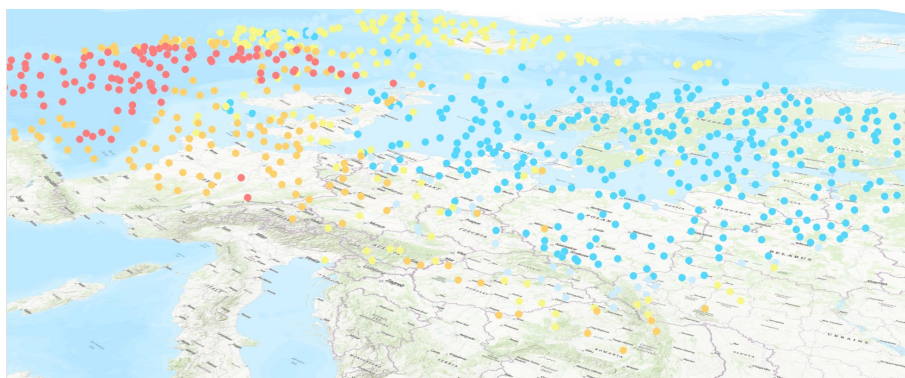
a následně *Cartographic offset*, kterým se definuje výška bodů nad povrchem (např. 200 km). Pro zobrazení bodů s proměnlivou výškou (obr. 37) je nutné v nastavení výšky zvolit *Features are: At an absolute height, A field*: atribut obsahující hodnoty z rastru, a poté vhodně nastavit *Vertical Exaggeration*, aby byly zvýrazněny výškové rozdíly mezi body (například 8). Výšku mračna lze také upravovat pomocí *Cartographic offset*. Stejný postup lze aplikovat i na nepravidelné bodové mračno (obr. 38).



Obr. 36: Pravidelné mračno bodů – všechny body ve stejné výšce



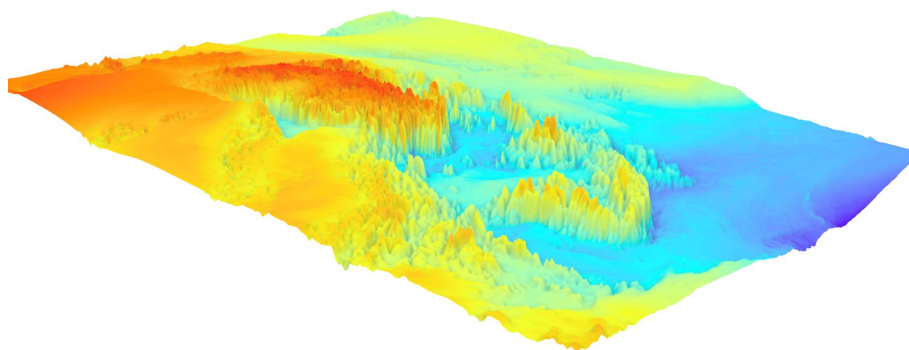
Obr. 37: Pravidelné mračno bodů – proměnlivá výška bodů v závislosti na hodnotě



Obr. 38: Nepravidelné mračno bodů – proměnlivá výška bodů v závislosti na hodnotě

3D povrch

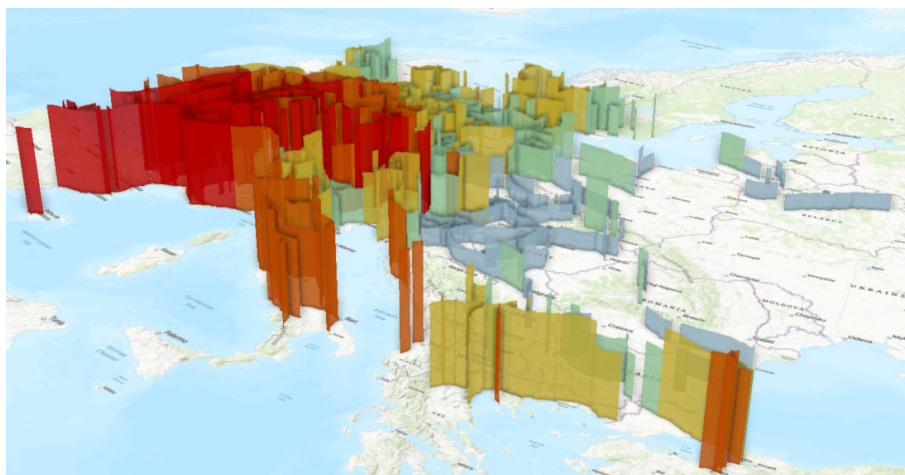
Pro tvorbu **3D povrchu** v ArcGIS Pro je potřeba z rastrové vrstvy udělat tzv. vrstvu výškového povrchu (Elevation Surface Layer). Toho lze docílit kliknutím pravým tlačítkem na vrstvu a v záložce *Elevation* zvolit možnost *Create Surface Layers From Sources*. Po kliknutí na vrstvu *Ground* se na horní liště objeví záložka *Elevation Surface Layer*, kde je možné nastavit převýšení povrchu (*Vertical Exaggeration*). Výsledkem je spojitý 3D povrch, kdy **výška a barva každé buňky odpovídá její hodnotě** (obr. 39).



Obr. 39: 3D povrch – výška buňky odpovídá hodnotě

Vertikální roviny

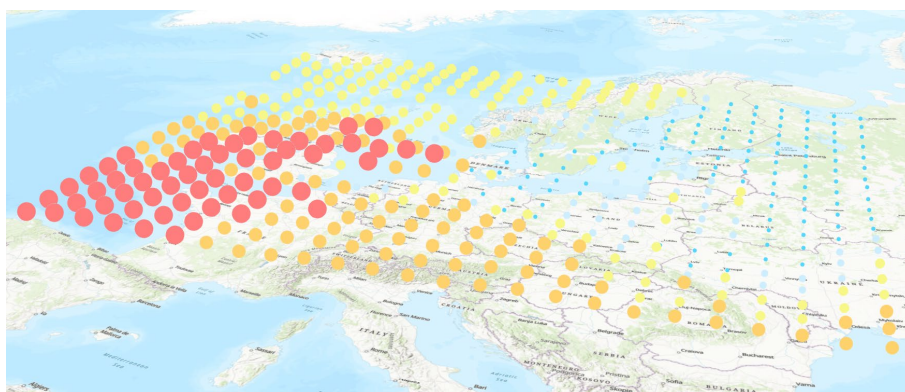
Pro tvorbu **vertikálních rovin** je nejprve nutné získat liniovou vrstvu obsahující hodnoty, na základě nichž budou roviny extrudovány (obr. 40). Pro ukázkou byla použita datová sada silnic z webu Natural Earth (www.naturalearthdata.com) v měřítku 1 : 10 000 000, přičemž byla použita pouze kategorie „Primary Highway“. Liniová data byla ořezána o rozsah rastrové vrstvy nástrojem *Clip*. Do linií byly pomocí nástroje *Add Surface Information* přidány informace o průměrné hodnotě teploty (Output Property → Mean Z). Nyní je možné linie díky doplněnému atributu extrudovat (Feature Layer → Extrusion), přičemž je potřeba vybrat typ extruze a pole s daným atributem. V případě potřeby lze také přidat nový atribut a hodnoty reklasifikovat. Nakonec může být upraven také znakový klíč tak, aby byly hodnoty znázorněny jak **extruzí**, tak **barvou**. Případně je možné upravit **průhlednost** rovin.



Obr. 40: Vertikální roviny – výška roviny reprezentuje průměrnou hodnotu v dané linii

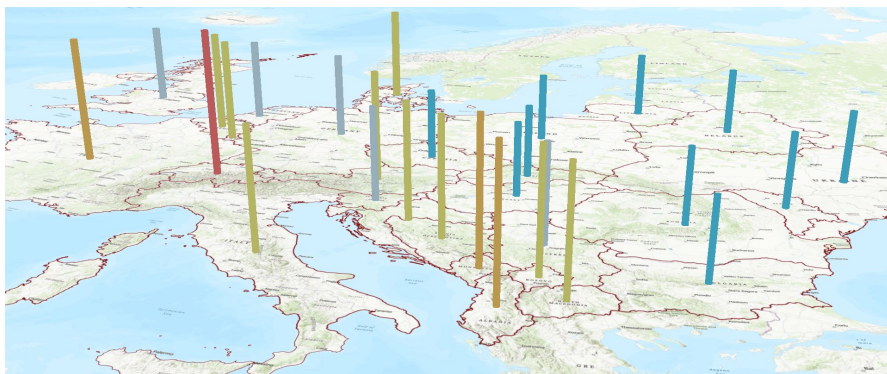
3D kartodiagram

Při tvorbě **bodového 3D kartodiagramu** z rastrových dat je opět nutné nejprve vytvořit bodovou vrstvu. Tu lze získat například vytvořením pravidelné mřížky (*Generate Tessellation*), následně vytvořením centroidů jednotlivých buněk (*Feature to Point*) a extrahováním hodnot z rastru do bodů (*Extract Values to Points*). V případě této ukázky byla vytvořena pravidelná mřížka o ploše buňky 10 000 km². 3D kartodiagram lze vztáhnout také k administrativním územním celkům, například ke státům, případně k dalším územním jednotkám. Pro jednotlivé regiony je možné spočítat například průměrnou hodnotu území pomocí nástroje *Zonal Statistics* a poté vytvořit bodovou vrstvu nástrojem *Feature to Point*. Podobně jako v případě bodového mračka mohou být body zobrazeny buď **ve stejné výšce**, nebo může být **výška proměnlivá** v závislosti na hodnotě bodu. Body mohou být rozmístěny pravidelně i nepravidelně. Pro vytvoření 3D kartodiagramů je třeba v nastavení znakového klíče vybrat *Graduated Symbols* nebo *Proportional Symbols*. Kromě velikosti se mohou jednotlivé diagramy lišit také barvou. Zobrazení bodů s proměnlivou výškou (obr. 41) lze docílit nastavením *Features are: At an absolute height* a *A field*: atribut obsahující hodnoty z rastru. Následně je možné upravit *Vertical Exaggeration* (například 5).



Obr. 41: Bodový 3D kartodiagram – pravidelně rozmístěné body s proměnlivou výškou

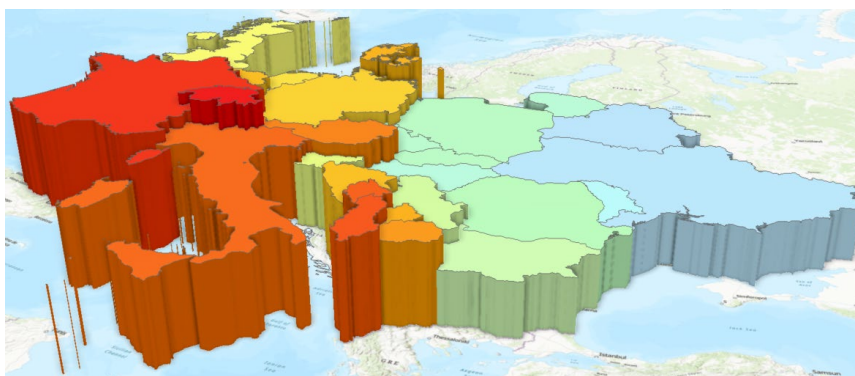
Postup tvorby **sloupcového kartodiagramu** lze demonstrovat na příkladu vybraných států Evropy. Nejprve je potřeba získat vrstvu států, případně jiných administrativních územních celků. Následně je nutné pro každé území **spočítat požadovanou hodnotu** (např. průměr, maximální hodnota). Toho lze docílit pomocí nástroje *Zonal Statistics*, kde je třeba **definovat zóny** (územní jednotky) pomocí vektorové nebo rastrové vrstvy. Zároveň je potřeba převést plošné jednotky na bodovou vrstvu (*Feature to Point*). Do těchto bodů lze následně extrahovat statistické hodnoty z plošných jednotek, vytvořených pomocí zonální statistiky (*Extract Values to Points*). U takto vytvořených bodů s atributem obsahujícím hodnoty daného jevu je potřeba nastavit extruzi (*Feature Layer* → *Extrusion*). Následně je možné vybrat typ extruze (*Base Height* nebo *Absolute Height*) a poté vybrat pole s daným atributem. V případě potřeby lze také přidat nový atribut a hodnoty reklasifikovat. Nakonec je vhodné upravit znakový klíč diagramů (např. klasifikované intervaly, spojitá stupnice). U sloupcového kartodiagramu se tedy kromě **výšky** může měnit také například **barva** sloupce na základě hodnoty atributu (obr. 42).



Obr. 42: Sloupcový 3D kartodiagram – sloupce s proměnlivou výškou vizualizující průměrnou hodnotu

3D kartogram

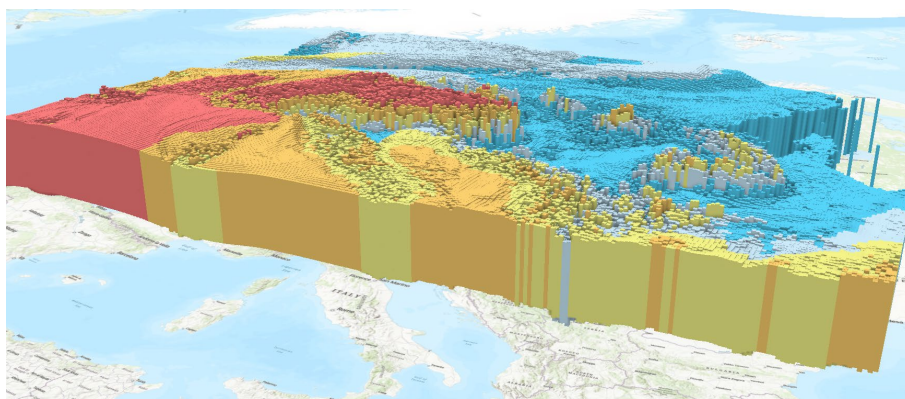
Jelikož **3D kartogram** nejčastěji vychází z administrativního členění, je nejprve potřeba získat polygonovou vrstvu s hodnotami vybraného jevu. Při tvorbě 3D kartogramu z rastrových dat je možné získat hodnoty pro jednotlivé oblasti (např. průměr, maximální hodnota) pomocí nástroje *Zonal Statistics*. Takto spočítané hodnoty lze následně extrahovat do bodů (*Feature to Point, Extract Values to Points*). Nyní je potřeba připojit hodnoty z bodů zpět do polygonů administrativních jednotek (*Spatial Join*). Tyto plošné jednotky je možné díky doplněnému atributu **extrudovat** (*Feature Layer → Extrusion*), přičemž je potřeba vybrat **typ extruze** a **pole s daným atributem**. V případě potřeby lze také přidat nový atribut a hodnoty **reklasifikovat**. Nakonec může být upraven také znakový klíč tak, aby byly hodnoty znázorněny jak **extruzí**, tak **barvou** (obr. 43).



Obr. 43: 3D kartogram – polygony s proměnlivou extruzí reprezentující průměrnou hodnotu

Voxely

Pro tvorbu **voxelů** (bloků s různou výškou na základě určitého atributu) je nutné podobně jako v případě mračna bodů nejprve **vytvořit pravidelnou čtvercovou mřížku** (*Generate Tessellation*), poté **pravidelnou bodovou vrstvu** (*Feature to Point*) a následně **extrahovat hodnoty z rastru do bodů** (*Extract Values to Points*). Informaci z těchto bodů je poté potřeba připojit zpět do čtvercové mřížky (nástroj *Spatial Join*). V nastavení výšky vrstvy (*Properties – Elevation*) je třeba zvolit *Features are: At an absolute height* a v poli *A field* vybrat atribut obsahující hodnoty z rastru, případně výraz matematický upravit (např. $\text{RASTERVALUE} / 50$). Dále je možné upravit *Vertical Exaggeration* a *Cartographic offset*. Po označení vrstvy s mřížkou se na horní liště objeví záložka *Feature Layer*, kde je možné nastavit **vytlačení jednotlivých buněk** (*Extrusion*). V případě ukázky byl zvolen typ *Base Height* s výškou 200 km. Výsledkem je diskrétní 3D povrch tvořený voxely, kdy výška každého bloku odpovídá hodnotě buňky (obr. 44).



Obr. 44: Voxely – proměnlivá výška buňky v závislosti na její hodnotě

7 INTEGRACE S MĚSTSKÝMI A VÝŠKOVÝMI 3D MODELÝ

Specifickými oblastmi 3D geovizualizace tematických dat je jejich vizualizace v různých měřítkách. Ta je potřeba vhodně stanovit na základě účelu vizualizace, charakteru dat a dalších aspektů. Vizualizace je také vhodné obohatit o **topografická data**, jako např. budovy, komunikace nebo hranice, což může uživatelům poskytnout lepší geografický kontext.

Příkladem detailního měřítka může být 3D geovizualizace meteorologických nebo klimatických dat v městském prostředí. Ta umožňuje podpořit validaci meteorologických modelů porovnáním výsledků simulace s morfologickými ukazateli použitými jako vstupní data simulace, například vhodnou vizuální analýzou vztahů mezi městskými **tepelnými ostrovy** (urban heat island) a **městským prostředím** (Gautier et al., 2020a). Studium městského klima ve větším měřítku znamená zohlednit prostorovou a geometrickou strukturu meteorologických dat, aby bylo možné je společně vizualizovat do stejného grafického rozhraní, rozšířeného o možnosti interakce pro jejich manipulaci a zkoumání (Christophe et al., 2022). Současným stavem problematiky vizuální analýzy urbánních 3D dat se zabývali Miranda et al. (2024). Kromě počasí a klimatu má ale smysl v městském prostředí zkoumat také **další tematické oblasti**, jako je např. doprava, životní prostředí nebo územní plánování a rozvoj.

Příkladem kontinentálního měřítka může být **kombinace meteorologických a výškových dat**. Ta umožňuje nejen přesnější interpretaci jevů, jako je distribuce srážek, proudění větru nebo teplotní rozdíly, ale i jejich **prostorové vazby na orografii**. Výšková data v podobě digitálního modelu terénu poskytují topografický kontext, který ovlivňuje šíření meteorologických jevů – například zadržování srážek v horských oblastech nebo tvorbu stínu větru.

Tato kapitola popisuje **praktické nasazení metod** definovaných v kapitolách 5 a 6 ve **dvou případových studiích**: **Jihlava** (detailní měřítko, územní potenciál pro bydlení) a **Evropa** (kontinentální měřítko, meteorologická data).

7.1 Detailní měřítko (případová studie Jihlava)

Pro **detailní měřítko** byla zvolena **lokální scéna bez zohlednění výškopisu a zakřivení Země**. Hlavní motivací tohoto dílčího cíle byl návrh a následné vyhodnocení 3D geovizualizace územního potenciálu. Za tímto účelem bylo **sedm metod 3D geovizualizace**, popsanych v předchozích dílčích cílech, aplikováno na **data o územní potenciál pro bydlení** v katastrálním území Jihlava. Výsledné vizualizace byly zveřejněny prostřednictvím interaktivní webové mapové aplikace v prostředí **ArcGIS Online** (<https://experience.arcgis.com/experience/ce5b6326328d4c8ebb90698414dea686>). 3D geovizualizační prostředí pro zkoumání dat územního potenciálu je u všech metod **interaktivní** a umožňuje uživateli volně pracovat s 3D scénou, přepínat vrstvy a metody vizualizace. Čtyři metody pokrývají celé území katastrálního území Jihlava. U tří metod (mračno bodů, 3D kartodiagram, voxely) nebylo z důvodu objemu dat pokryto celé katastrální území Jihlava, protože by se vizualizace dlouho načítala, což by zhoršilo uživatelský zážitek. Symboly jsou vykresleny na tzv. **rozvojových plochách pro bydlení** a jejich čtyřicetimetřovém okolí. Po vytvoření vizualizací bylo provedeno **dotazníkové šetření**, jehož cílem bylo zjistit využitelnost a srozumitelnost různých forem 3D geovizualizace územního potenciálu.

Tato podkapitola vychází z článku *Exploring Unconventional 3D Geovisualization Methods for Land Suitability Assessment: A Case Study of Jihlava City* (Bittner, Zejdlik et al. 2025).

Použitá data

Vizualizované vrstvy představující **územní potenciál** a jeho **časové rozdíly** byly vytvořeny v rámci případové studie Jihlava, kterou provedli Bittner a Burian (2024). V této studii byla použita metodika **Urban Planner** (Burian et al., 2015; 2018), která byla implementována v rámci města Jihlavy. Bylo použito celkem 32 hodnotících kritérií pro posouzení územního potenciálu pro bydlení a průmysl a logistiku ve třech časových horizontech: 2023, 2028 a 2033. Zdroje dat použité v analýze **zahrnovaly volně přístupné datové sady** (např. OpenStreetMap), **data poskytnutá městem Jihlava** a také **urbanistické studie a investiční plány** (Bittner a Burian, 2024). Pro účely tohoto dílčího cíle, jehož hlavním cílem je ukázat různé možnosti vizualizace územního potenciálu ve 3D, bylo vybráno pět vrstev:

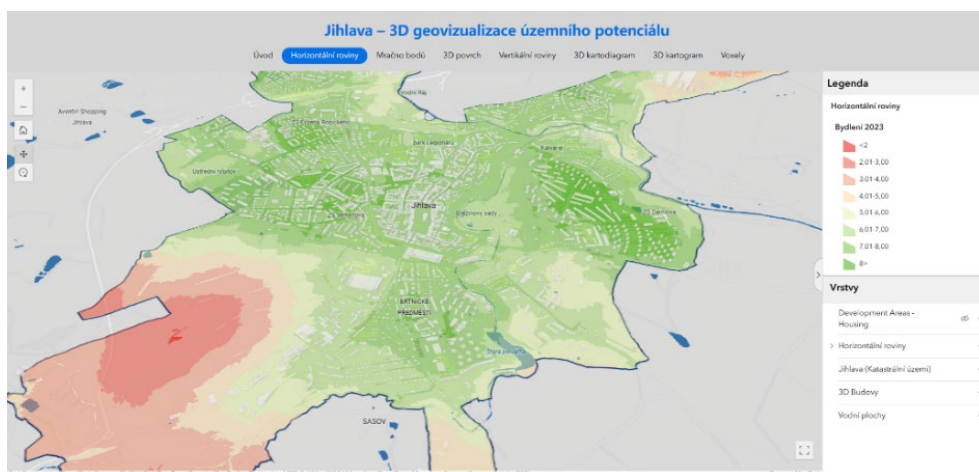
- územní potenciál pro bydlení v roce 2023,
- územní potenciál pro bydlení v roce 2028,
- územní potenciál pro bydlení v roce 2033,
- změna územního potenciálu pro bydlení mezi lety 2023 a 2028,
- změna územního potenciálu pro bydlení mezi lety 2023 a 2033.

Ačkoliv byla dostupná data pro celé území města Jihlavy, byly pro účely tohoto dílčího cíle vizualizace provedeny pouze v rámci **katastrálního území Jihlava**. Hlavním důvodem zmenšení studovaného území byly vysoké výpočetní nároky a omezení rychlosti vykreslování spojené se zpracováním dat na platformě ArcGIS Online.

Webová aplikace

Vizualizační metody byly **integrovány do webové aplikace** v prostředí **ArcGIS Online** vytvořené pomocí nástroje **ArcGIS Experience Builder** (obr. 45). Nejprve byla data zpracována v aplikaci ArcGIS Pro. Pro jednotlivé metody bylo v prostředí ArcGIS Online vytvořeno **sedm 3D scén**, přičemž pro vizualizaci byla použita možnosti *2D Counts and Amounts* nebo *3D Counts and Amounts* s adekvátním nastavením znakového klíče. V případě 3D povrchu byl rastr územního potenciálu nastaven jako „Elevation Layer“. Tyto scény byly integrovány do prostředí ArcGIS Experience Builder a byla vytvořena **webová mapová aplikace**. Kromě tematických vrstev územního potenciálu byly do aplikace přidány **další vrstvy**, a to rozvojové plochy pro bydlení, 3D budovy, vodstvo a hranice katastrálního území Jihlava. Tyto topografické vrstvy pomáhají uživatelům lépe se orientovat ve 3D scéně a odvozovat prostorové vztahy. Přesné hodnoty územního potenciálu lze zjistit po kliknutí na prvek.

Aplikace obsahuje osm stránek – **úvod** a **sedm stránek pro jednotlivé metody**. V úvodu se uživatel může seznámit s aplikací a sedmi metodami 3D geovizualizace. Ostatní záložky obsahují vždy vizuálně **dominantní okno s 3D scénou** zobrazující údaje o územním potenciálu pomocí různých metod. Vpravo se nachází postranní panel, v jehož horní části je **legenda**, která se dynamicky mění v závislosti na aktivních vrstvách. Vrstvy lze přepínat v dolní části postranního panelu.



Obr. 45: Webová aplikace v ArcGIS Online

Struktura dotazníku

Pro objektivní zhodnocení 3D geovizualizace územního potenciálu pomocí různých metod bylo provedeno **dotazníkové šetření mezi odborníky**, kteří mají zkušenosti s metodikou Urban Planner. Průzkum byl zaměřen na odborníky městských úřadů vybraných měst v Česku a na Slovensku, kteří se zabývají **územním plánováním** a GIS. V těchto městech byla analýza územního potenciálu pomocí metodiky Urban Planner provedena již dříve, takže respondenti jsou s těmito daty obeznámeni. Dotazník byl vytvořen v programu **ArcGIS Survey123**. Dotazník je strukturován do devíti částí. V úvodní části je respondent seznámen s výzkumem, specifiky webové mapové aplikace a použitými daty. Jsou zde také popsána doporučení, jak s aplikací pracovat. Po úvodu následuje sedm částí pro každou metodu. Ty vždy obsahují ilustraci metody a otázky, které se u každé metody opakují (obr. 46):

- **Jak se vám s touto metodou pracuje?** (velmi špatně – špatně – neutrálně – dobře – velmi dobře)
- **Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?** (nesouhlasím – spíše nesouhlasím – nevím – spíše souhlasím – souhlasím)
- **Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?** (nesouhlasím – spíše nesouhlasím – nevím – spíše souhlasím – souhlasím)
- **Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro tuto metodu?** (nevýznamné – spíše nevýznamné – neutrální – spíše významné – významné)
- **Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.** (otevřená odpověď)

Dotazník uzavírají otázky pro celkové zhodnocení a informace o respondentovi:

- **Ohodnoťte každou metodu 3D geovizualizace na stupnici od 1 (nejlepší) do 5 (nejhorší).**
- **Považujete možnost vizualizace územního potenciálu ve 3D za smysluplnou?** (otevřená odpověď)
- **Pracujete s 3D vizualizacemi/modely?** (ano/ne)
- **Jaká je vaše role v územním plánování?** (urbanista, GIS specialista, odborník na životní prostředí, architekt, jiná)

Aby došlo ke **zjednodušení dotazníku** a zvýšila se pravděpodobnost na jeho dokončení, nebyly u otázky ohledně významnosti grafických proměnných použity všechny proměnné, které se u jednotlivých metod uplatňují. Vyřazena byla např. textura/vzor, nejistota nebo perspektiva, jelikož by tyto proměnné mohly být pro respondenty náročné na zhodnocení. Jas, tón a sytost barvy byly sjednoceny do jedné kategorie „barva“.

3D geovizualizace územního potenciálu

Horizontální roviny

Jak se vám s touto metodou pracuje?*

Velmi špatně Špatně Neutrálně Dobře Velmi dobře

Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Obr. 46: Ukázka dotazníku pro hodnocení 3D geovizualizace územního potenciálu

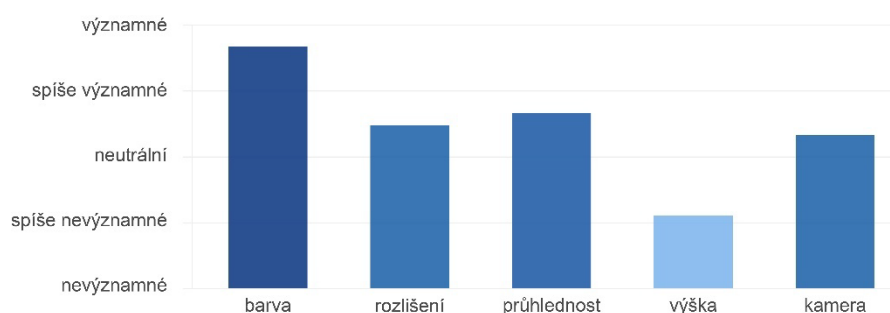
7.1.1 Horizontální roviny a městská zástavba

Metodu **horizontálních rovin** (obr. 47) hodnotili respondenti jako **jasnou, intuitivní a uživatelsky přívětivou**. Její hlavní výhoda spočívá v **přímočarém znázornění hodnot** územního potenciálu, které jsou **snadno pochopitelné** i pro neoborníka. Uživatelé oceňovali jeho **podobnost s tradičními 2D mapami**, snadnou navigaci v prostředí a jasnou interpretaci barevné škály, která účinně vyjadřuje prostorové rozložení jevu. Tuto metodu považují za zvláště vhodnou pro získání celkového přehledu o větší oblasti. Její použití v detailních měřítkách však naráží na **určitá omezení**. Při přiblížení se vizualizované plochy mohou rozpadat a kombinace povrchové vrstvy s 3D modely budov může působit matoucím dojmem. Navíc byly vyjádřeny obavy z umístění vizualizační roviny nad povrchem terénu, což ztěžuje prostorovou orientaci a snižuje potenciál 3D modelů. Další kritika se týkala **volby barevné škály** – některé kategorie měly tendenci v celkovém zobrazení splývat a možnost zvýraznit rozdíly nebo změny v jednotlivých oblastech nebyla dostatečně zdůrazněna. Navzdory těmto nedostatkům většina respondentů považovala tuto vizualizaci za **účinný nástroj** pro prezentaci územního potenciálu, zejména pokud je zachována odpovídající úroveň průhlednosti a jsou optimalizovány technické parametry zobrazení (např. omezení blikání při zvětšování a otáčení).



Obr. 47: Horizontální roviny v kontextu městské zástavby

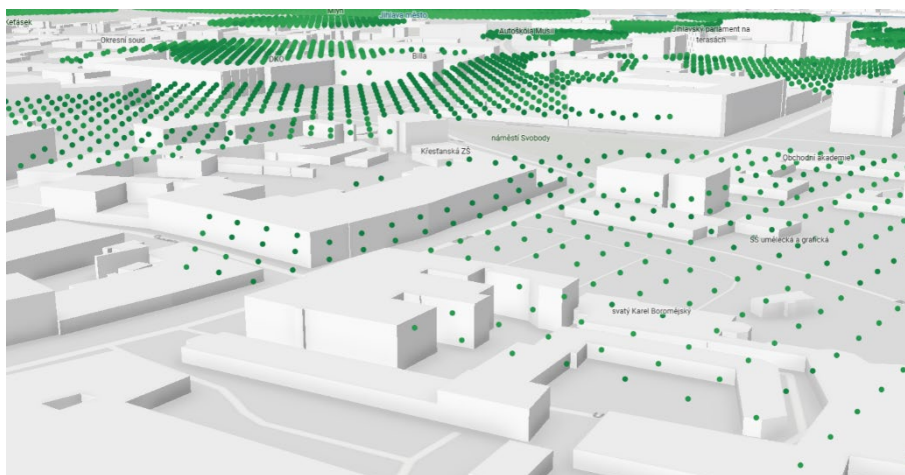
V případě horizontálních rovin bylo hodnoceno **pět grafických proměnných** (obr. 48). Jako velmi významnou uživatelé považují **barvu**, naopak výška je podle respondentů u této metody spíše nevýznamná. Rozlišení, průhlednost a kamera byly hodnoceny jako neutrální až spíše významné.



Obr. 48: Průměrné hodnocení metody „horizontální roviny“ podle významnosti grafických proměnných

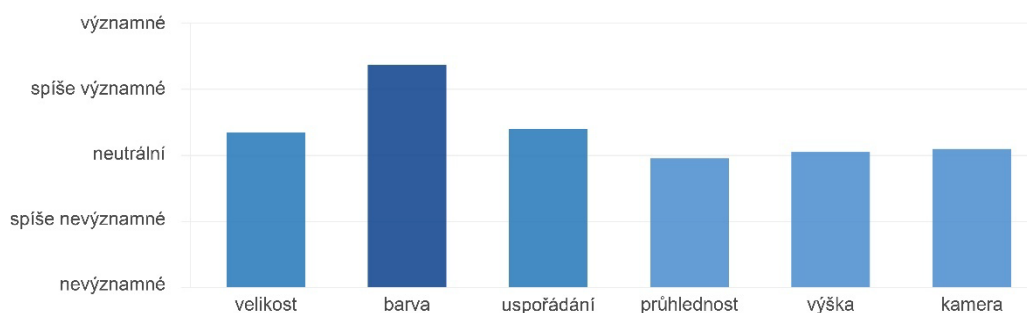
7.1.2 Mračno bodů a městská zástavba

Vizualizace územního potenciálu pomocí **mračna bodů** (obr. 49) byla respondenty hodnocena poměrně **rozporuplně**. Někteří oceňovali schopnost této metody lépe **zvýraznit potenciál menších ploch** ve srovnání s tradičním zobrazením pomocí horizontálních rovin. Pozitivně bylo také hodnoceno, že **podkladová mapa zůstala čitelná** i bez nastavení průhlednosti a že do vizualizace byly zahrnuty pouze oblasti s významným potenciálem. Na druhou stranu kritika se převážně zaměřovala na celkovou špatnou přehlednost a interpretovatelnost metody. Většině respondentů nebyl jasný význam jednotlivých bodů – zejména jejich výška, hustota a velikost. Barva byla často jediným referenčním bodem, ale kvůli nejasné barevné škále a nedostatku přesných popisů byla výsledná vizualizace vnímána jako nepříliš informativní. Po přiblížení se vizualizace často jevila jako matoucí a potenciální hodnoty byly podle některých uživatelů rozeznatelné pouze prostřednictvím **interaktivních prvků** (např. vyskakovacích oken), nikoliv přímo ze samotné vizualizace. Další kritika směřovala k technickému provedení. V některých případech se vizualizace **načítala pomalu**, což může být omezující při práci s většími soubory dat. Nevhodná barevná schémata také mohla způsobit, že body splývaly s pozadím. Prostorová okluze budovami při naklonění pohledu spolu s obtížemi při posuzování výšky bodů dále snižovaly uživatelskou přívětivost. Celkově byla metoda mračna bodů vnímána jako **méně vhodná** pro přímou interpretaci územního potenciálu, a to především kvůli obtížné interpretaci hodnot, méně běžné formě vizualizace a nízké intuitivnosti výsledků.



Obr. 49: Pravidelné mračno bodů v kontextu městské zástavby

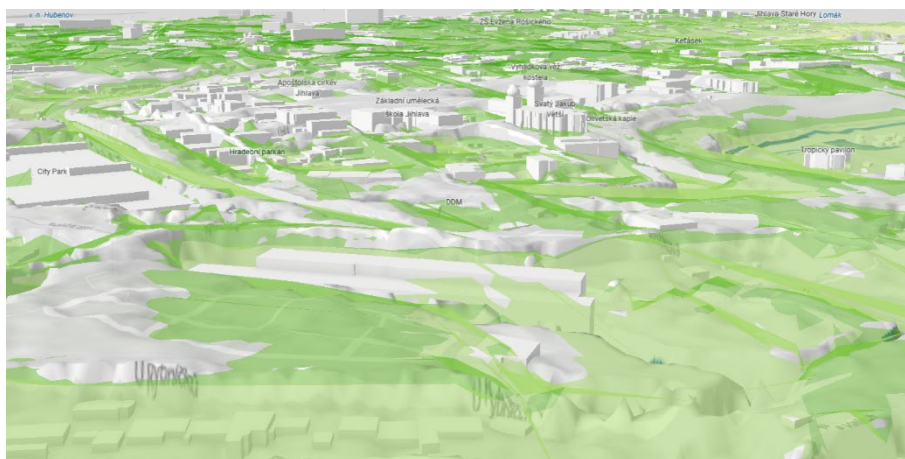
V případě mračna bodů bylo hodnoceno **šest grafických proměnných** (obr. 50). Nejvyšších hodnot významnosti dosahovala **barva**. Velikost a uspořádání byly hodnoceny jako mírně významné. Průhlednost, výška a kamera byly považovány za neutrální.



Obr. 50: Průměrné hodnocení metody „mračno bodů“ podle významnosti grafických proměnných

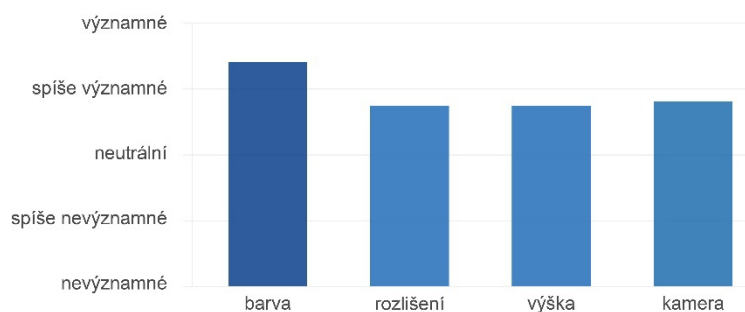
7.1.3 3D povrch a městská zástavba

Vizualizaci územního potenciálu prostřednictvím **3D povrchu** (obr. 51) hodnotili respondenti jako **vizuálně přitažlivou**, ale **obtížně interpretovatelnou**. Metoda umožňuje **zvýraznit kontrastní hodnoty**, takže je vhodnější pro analýzu menších ploch s velmi různorodým potenciálem. Uživatelé opakovaně poukazovali na **sníženou čitelnost** v důsledku stínování, optického zkreslení a jednotné výškové úrovně rozvojových ploch. V některých případech byla orientace v území považována za náročnou, a to i ve známém prostředí. Významným omezením byl také **pomalejší výkon vykreslování** a obtížná interpretace barevné škály na zvlněném terénu. Celkově byla metoda považována za nevhodnou pro prezentaci územního potenciálu, zejména v zastavěných oblastech, kde prostorový efekt nenabízel žádnou přidanou informační hodnotu ve srovnání se standardní 2D vizualizací.



Obr. 51: 3D povrch v kontextu městské zástavby

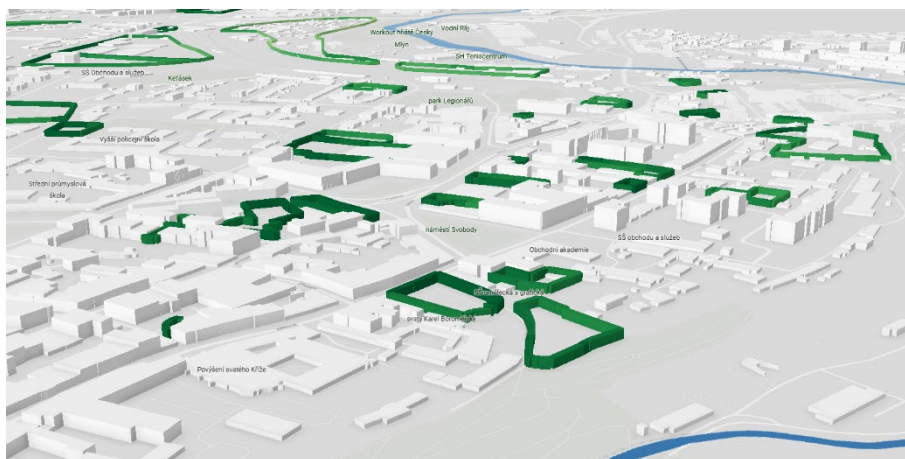
V případě 3D povrchu byly hodnoceny **čtyři grafické proměnné** (obr. 52). Za nejvýznamnější považovali uživatelé opět **barvu**. Průměrné hodnocení ostatních tří proměnných (**rozlišení, výška, kamera**) se pohybovalo pod hranicí „spíše významné“.



Obr. 52: Průměrné hodnocení metody „3D povrch“ podle významnosti grafických proměnných

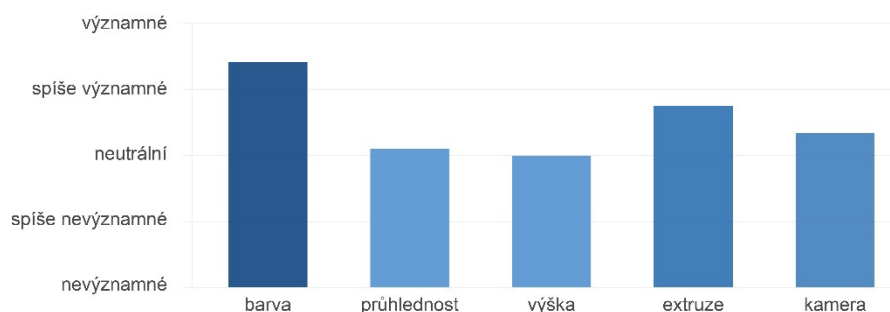
7.1.4 Vertikální roviny a městská zástavba

Metoda vizualizace pomocí **vertikálních rovin** (obr. 53) byla hodnocena **různě**. Její hlavní výhoda spočívá ve schopnosti zvýraznit a porovnat úroveň územního potenciálu podél bezprostředních hranic konkrétních oblastí. Tato vlastnost však zároveň představuje klíčové omezení – metoda **neumožňuje interpretaci potenciálu uvnitř polygonů**, což může vést ke ztrátě důležitých informací. Z hlediska přehlednosti a čitelnosti byla metoda vnímána jako **méně intuitivní**, zejména u složitějších prostorových struktur s vnořenými hranicemi. Někteří uživatelé ji považovali za matoucí, přičemž uváděli nedostatečné výškové rozlišení a obtížnost vzájemného odlišení barevných gradientů. V několika případech byla ale metoda považována za intuitivní a vizuálně poutavou, zejména v kontextu zastavěného prostředí. Celkově je však vhodnější pro **specifické účely** (např. porovnávání hraničních hodnot mezi lokalitami), než pro komplexní analýzu územního potenciálu v celém území.



Obr. 53: Vertikální roviny v kontextu městské zástavby

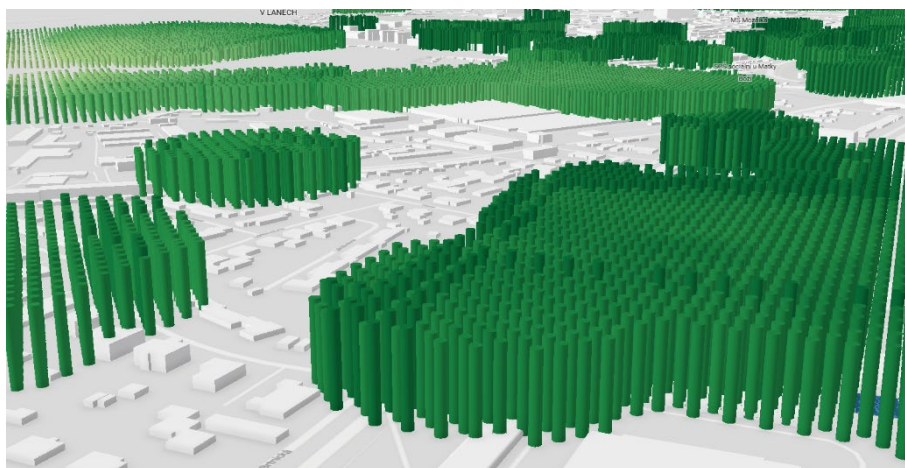
V případě vertikálních rovin bylo hodnoceno **pět grafických proměnných** (obr. 54). Nejvýznamnější proměnnou byla **barva**. Významnost extruze a kamery se pohybovala mezi „neutrální“ a „spíše významné“. Průhlednost a výška byly považovány za neutrální.



Obr. 54: Průměrné hodnocení metody „vertikální roviny“ podle významnosti grafických proměnných

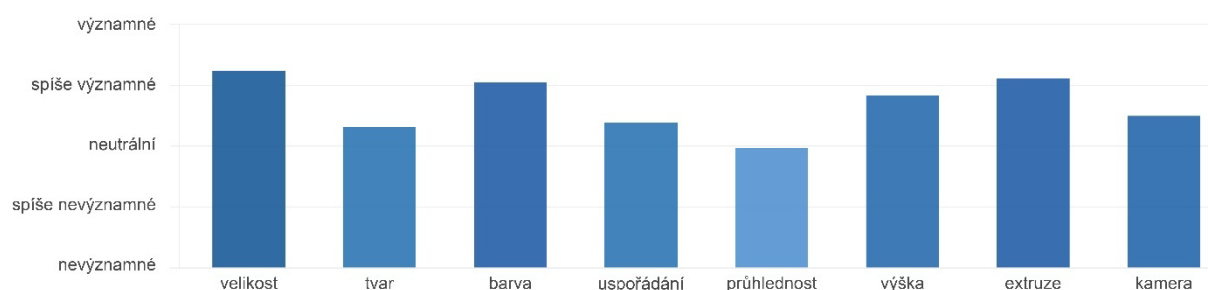
7.1.5 3D kartodiagram a městská zástavba

Metoda **3D kartodiagramu** (obr. 55) využívá výšku válce ke znázornění územního potenciálu, což podle respondentů umožňuje vizualizaci malých i velkých ploch s jasně viditelnou podkladovou mapou, zejména při pohledu z optimálního úhlu. Tento přístup je **podobný metodě mračna bodů**, ale poskytuje **vizuální vylepšení** díky použití vertikální extruze. Některé kritické připomínky se však zaměřují na nedostatečné rozlišení výšky válců, což ztěžuje přesnou interpretaci hodnot. Mezi další obavy patří pomalé načítání a složitost určení přesných územního potenciálu. Někteří uživatelé také zpochybnili nutnost kombinovat výšku a barvu pro znázornění téhož jevu s tím, že to může vést k vizuálnímu zkreslení. Metoda je považována za vhodnou pro pokročilé uživatele, i když její přidaná hodnota ve 3D podobě není vždy zřejmá. Pro zlepšení její účinnosti by bylo vhodné **zvýšit kontrast výšky i barvy**, což by zvýšilo přehlednost a přesnost při interpretaci územního potenciálu.



Obr. 55: Sloupcový 3D kartodiagram v kontextu městské zástavby

V případě 3D kartodiagram bylo hodnoceno **osm grafických proměnných** (obr. 56). **Velikost, barva, výška a extruze** byly hodnoceny jako spíše významné. Tvar, uspořádání a kamera byly považovány za mírně významné. Průhlednost je v případě této metody neutrální.



Obr. 56: Průměrné hodnocení metody „3D kartodiagram“ podle významnosti grafických proměnných

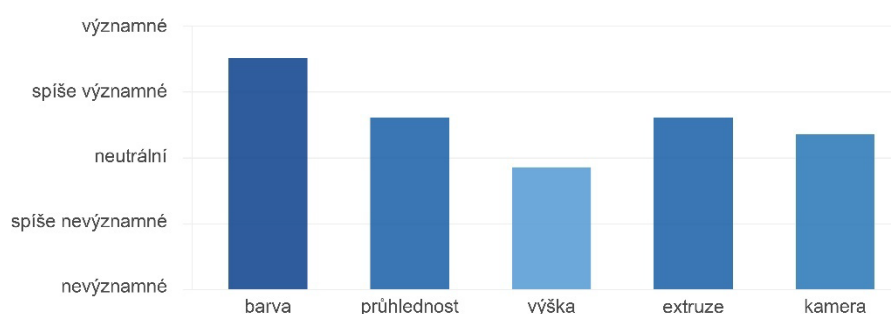
7.1.6 3D kartogram a městská zástavba

Metoda **3D kartogramu** (obr. 57) se zaměřuje na vybrané lokality a k znázornění hodnot používá barvu a extruzi, což podle respondentů umožňuje **snadnou interpretaci vizualizace**. Tento přístup je účinný pro zobrazení **průměrného územního potenciálu** v konkrétních lokalitách, ale nezprostředkovává podrobné charakteristiky celého území nebo konkrétní hodnoty potenciálu v něm. Metoda je vhodná zejména v případě, kdy je cílem mapy prezentovat průměrný potenciál, nikoli provádět podrobnou analýzu. Mezi pozitivní aspekty metody patří její **intuitivnost a přehlednost**, zejména **v kombinaci se zobrazením budov**. U 3D modelů měst je tato metoda považována za přínosnou, protože umožňuje lépe zviditelnit územní potenciál v zastavěných oblastech. Byly vyjádřeny určité obavy ohledně omezené diferenciaci při extruzi a použití barev, což by mohlo vést k určitému vizuálnímu zkreslení. Celkově je tato metoda považována za **konzervativní a dobře zavedenou**, s některými návrhy na zlepšení výškové a barevné diferenciaci pro zvýšení celkové přehlednosti.



Obr. 57: 3D kartogram v kontextu městské zástavby

V případě 3D kartogramu bylo hodnoceno **pět grafických proměnných** (obr. 58). Nejvyšší průměrnou hodnotu významnosti měla opět **barva**. Průhlednost, extruze a kamera se pohybovaly mezi „neutrální“ a „spíše významné“. Výška je v případě této metody považována za neutrální.



Obr. 58: Průměrné hodnocení metody „3D kartogram“ podle významnosti grafických proměnných

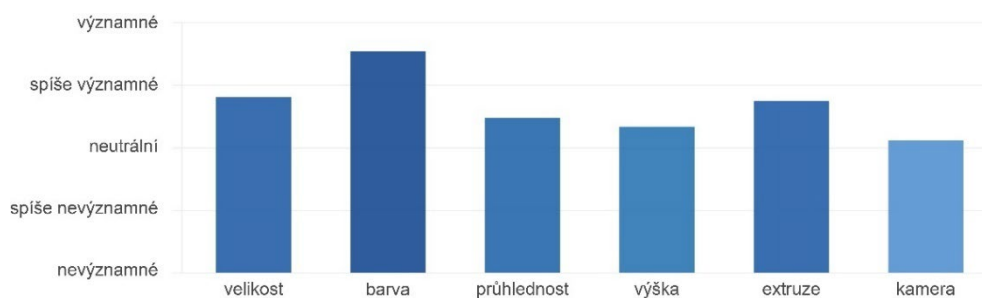
7.1.7 Voxely a městská zástavba

Na základě odpovědí z dotazníkového šetření lze metodu **voxelů** (obr. 59) přirovnat ke 3D kartogramu. Zvláštní pozornost je však třeba věnovat nastavení průhlednosti, aby byla zajištěna viditelnost podkladových mapových vrstev. To se ne vždy dařilo kvůli velké extruzi, která často **zakrývala viditelnost staveb**. Výsledná vizualizace je silně ovlivněna **velikostí voxelů**, což má vliv na úroveň podrobnosti zobrazených dat. Uživatelé často opakovaně uváděli pomalé načítání a zpožděné vykreslování, což komplikuje použitelnost metody, zejména u větších ploch. Tato metoda může být vhodná pro vizualizaci územního potenciálu ve **velkém měřítku**, kde voxely poskytují zobrazení na úrovni povrchu. Ve formě 3D sloupců však bývá vytlačování příliš výrazné, a ne vždy přesně odráží skutečný potenciál. V zastavěných oblastech mohou voxely působit rušivě a mohou vytvářet mylný dojem, že představují konkrétní návrhy staveb, což není zamýšleným účelem. Nesouvislost voxelů v kombinaci s použitím barev často vede ke špatné čitelnosti a ztěžuje schopnost rozlišit jemné barevné odchylky, což ztěžuje analýzu. Celkově je metoda voxelů považována za **náročnou na interpretaci** a výpočetní výkon, což omezuje její širší použitelnost. Přesto má potenciál pro podrobnou analýzu menších oblastí, kde by mohla být efektivně využita za předpokladu, že se zlepší výkon vykreslování a rozlišení jednotlivých hodnot.



Obr. 59: Voxely v kontextu městské zástavby

V případě voxelů bylo hodnoceno **šest grafických proměnných** (obr. 60). Jako nejvýznamnější byla ohodnocena **barva**. **Velikost** a **extruze** byly považovány jako spíše významné. Zbylé tři proměnné (průhlednost, výška, kamera) byly také hodnoceny jako neutrální až spíše významné.



Obr. 60: Průměrné hodnocení metody „Voxely“ podle významnosti grafických proměnných

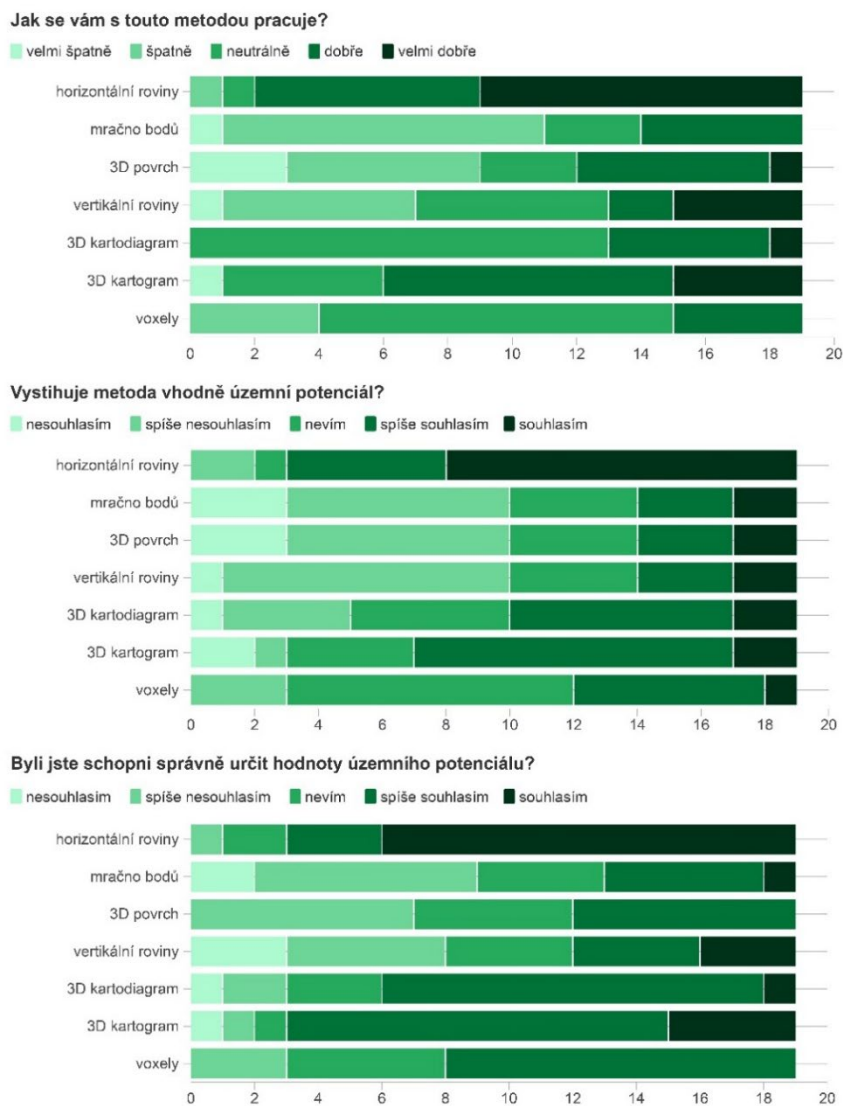
7.1.8 Srovnání metod – Jihlava

Ačkoliv bylo **osloveno 36 respondentů**, přičemž byli požádáni o další šíření dotazníku mezi své kolegy, dotazníkové šetření nakonec vyplnilo **pouze 19**. Z toho deset **GIS specialistů**, dva **urbanisté** a jeden **architekt**. Zbývajících šest respondentů označilo možnost „Jiné“. Čtrnáct respondentů pravidelně pracuje s 3D vizualizacemi nebo 3D modely. Ačkoli záměrné zaměření na zkušené odborníky posiluje vnitřní validitu výsledků, malý počet respondentů omezuje širší pohledů. Navíc relativně nízká míra odezvy naznačuje možnou selekční zaujatost, kdy se průzkumu zúčastnili pravděpodobně pouze ti, kteří mají o dané téma velký zájem, což mohlo zpětnou vazbu zkreslit.

Z dotazníkového šetření vyplývá, že jako **nejvýznamnější grafickou proměnnou** napříč všemi metodami uživatelé považují **barvu**. Významnost dalších proměnných je proměnlivá v závislosti na metodě, ale nejvyšších hodnot dosahuje **velikost**, **extruze** a **průhlednost**. Tento výsledek zároveň odpovídá subjektivnímu hodnocení významnosti grafických proměnných v kapitole 6.1.7. Jediný rozdíl je u proměnných „výška“, kterou uživatelé hodnotili jako o něco méně významnou než v případě subjektivního hodnocení, a „průhlednost“, která byla naopak uživateli hodnocena jako poměrně významná, ačkoli nadměrné využití průhlednosti může výslednou vizualizaci udělat nepoužitelnou. Tyto výsledky jsou zároveň **odpovědí na první výzkumnou otázku** „Jaké grafické proměnné jsou při vizuální analýze ve 3D nejvýznamnější?“.

U každé metody byly kromě otázky na grafické proměnné položeny ještě tři další otázky a uživatelé měli možnost odpovědět na stupnici od „velmi špatně“ po „velmi dobře“ a od „nesouhlasím“ po „souhlasím“. Vyhodnocení odpovědí na tyto otázky je graficky znázorněno na obr. 61.

Podle otázky „Jak se vám s touto metodou pracuje?“ vyšly nejlépe **horizontální roviny** a **3D kartogram**, zatímco nejhorší výsledky měly mračno bodů a 3D povrch. Metoda **3D kartodiagramu** byla jedinou metodou, která neměla žádné hodnocení „špatně“ nebo „velmi špatně“. **Vertikální roviny** vychází jako **nejkontroverznější**, protože získaly mnoho kladných i záporných hodnocení. Voxely vyšly jako nejvíce neutrální, protože je nikdo nehodnotil jako „velmi špatně“, ale ani jako „velmi dobře“. Uživatelé zvolili **horizontální roviny** jako nejlepší metodu pro reprezentaci územního potenciálu. Dalšími pozitivně hodnocenými metodami byly **3D kartodiagram** a **3D kartogram**. Tři metody (mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny) měly velmi podobné výsledky a pokrývaly celou škálu odpovědí. Metoda voxelů měla nejvyšší podíl odpovědí v kategorii „nevím“. Uživatelé nejlépe určili hodnoty územního potenciálu pomocí horizontálních rovin. Dobrých výsledků dosáhly také metody 3D kartogram, 3D kartodiagram a voxely. V případě mračna bodů, 3D povrchu a vertikálních rovin převažovaly neutrální nebo negativní odpovědi.



Obr. 61: Vyhodnocení odpovědí na otázky k jednotlivým metodám

V celkovém hodnocení zvolili respondenti jako nejlepší metodu **horizontální roviny**, která se nejvíce podobá klasickým 2D vizualizacím. Dalšími dobře hodnocenými metodami byly 3D kartogram, voxely a mračno bodů. Naopak jako nejhorší zvolili uživatelé metody 3D povrch a vertikální roviny. Žádná metoda však neměla průměrné hodnocení nižší než 3 body (obr. 62).



Obr. 62: Průměrné hodnocení metod 3D geovizualizace respondenty na pětibodové stupnici

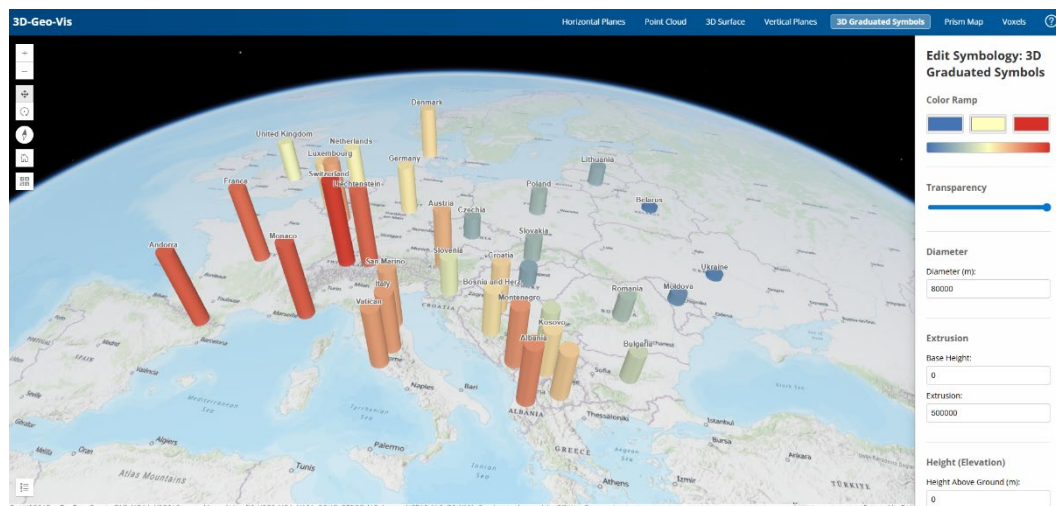
7.2 Kontinentální měřítko (případová studie Evropa)

Pro **kontinentální měřítko** byla zvolena **globální scéna se zohledněním výskopisu a zakřivení Země** (tzv. virtuální glóbus). Při tvorbě 3D geovizualizačního prostředí přímo v prostředí **ArcGIS Online** (konkrétně v ArcGIS Experience Builder – podkapitola 7.1) vyšly na povrch **určité limity tohoto řešení**. Proto bylo přistoupeno na variantu, která stále využívá technologii ArcGIS, ale umožňuje větší svobodu: **ArcGIS Maps SDK for JavaScript** (Esri, 2025). Díky SDK je možné pomocí JavaScriptu načítat vrstvy z ArcGIS Online a přímo přistupovat k jejich vlastnostem, což mimo jiné umožňuje **úpravu grafických proměnných „on the fly“** přímo v prohlížeči.

7.2.1 Popis aplikace 3D-Geo-Vis

Aplikace pracovně nazvaná **3D-Geo-Vis** vytvořená v rámci této podkapitoly slouží jako **prototyp**, z něž bude vycházet **výsledné 3D geovizualizační prostředí**, které je předmětem čtvrtého dílčího cíle (kap. 8). Aplikace je postavena na architektuře **HTML / CSS / JavaScript** a zdrojové kódy byly zpřístupněny veřejnosti na platformě **GitHub** (https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis). Aplikace je dostupná online na tomto odkaze: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis/horizontal.html. Pro vizualizace byla použita data předpovědního modelu **ALADIN** (konkrétně teplota vzduchu 1. ledna 2014 o půlnoci) a mění se pouze **metoda 3D geovizualizace**. Pro jednotlivé metody byla data zpracována podle postupu tvorby popsaného v podkapitole 6.2 a následně publikována do ArcGIS Online.

Každá metoda je řešena jako **samostatná podstránka**, mezi kterými lze přepínat v pravé horní části aplikace (obr. 63). Zde je zároveň dostupná **nápověda** (ikona otazníku) obsahující informace o ovládání aplikace a tiráž. Největší plochu zabírá samotné **mapové okno**, kde jsou vykreslena podkladová a tematická data. Aplikace obsahuje několik **nástrojů**, a to konkrétně tlačítka pro přiblížení a oddálení, pohyb a rotaci scény, návrat do počátečního pohledu, změnu podkladové mapy a legendu. Nejdůležitějším prvkem je **pravý boční panel, který umožňuje interaktivní úpravu znakového klíče v reálném čase**. Grafické proměnné, které může uživatel upravovat, se mění v závislosti na metodě (viz kap. 5.2 a 6). Jsou tedy vždy dostupné právě ty proměnné, které jsou **pro danou metodu relevantní**, a které jsou technicky proveditelné (například není možná interaktivní úprava vertikálního převýšení v případě 3D povrchu). Veškeré úpravy se aplikují okamžitě a není potřeba je nijak potvrzovat.



Obr. 63: Prototyp 3D geovizualizačního prostředí – příklad 3D kartodiagramů

7.2.2 Popis kódu (příklad 3D kartodiagramu)

Pro ukázkou **popisu zdrojového kódu aplikace** byla vybrána metoda 3D kartodiagramu, jelikož poskytuje uživateli nejvíce možností úpravy znakového klíče a jeví se jako **nejvíce reprezentativní**. Z ostatních metod je největší rozdíl u 3D povrchu, kde je navíc definován vlastní výškopis z rastru publikovaného do ArcGIS Online. Každý ze sedmi skriptů je rozdělen do několika konzistentních bloků:

- **Map & Layers** – inicializace mapového objektu a definice tematických vrstev (FeatureLayer, případně ElevationLayer).
- **View** – vytvoření 3D scény pomocí SceneView, nastavení výchozí kamery, kvality zobrazení a parametrů prostředí.
- **Widgets** – integrace standardních ovládacích prvků (např. podkladové mapy, legenda) prostřednictvím widgetů API.
- **Symbology** – načtení ovládacích prvků z HTML (color pickery, posuvníky průhlednosti, volba velikosti či tvaru symbolu). Součástí je panel s náhledem barevné škály.
- **Help** – implementace jednotného modálního okna s nápovědou, dostupného z ikony otazníku v pravém horním rohu.
- **Helpers / Renderers / Apply** – pomocné funkce pro aktualizaci náhledu barevné škály, nastavení rendererů a aplikaci znakového klíče na vrstvy.
- **Listeners** – naslouchání událostem z uživatelského rozhraní a vyvolání odpovídajících změn.
- **Zoom** – úvodní procedura, která po načtení dat nastaví znakový klíč, spustí animovaný přechod kamery do zájmové oblasti a následně odemkne plnou funkcionalitu (změna komplexnějších parametrů).

Úvodní blok kódu zajišťuje **načtení potřebných modulů** ArcGIS API for JavaScript a spuštění aplikace až po kompletním načtení DOM (vnitřní reprezentace webové stránky). Konstrukce `document.addEventListener("DOMContentLoaded", ...)` brání chybám při práci s prvky, které ještě nejsou dostupné. Funkce `require([...], function(...) { ... })` představuje modulární způsob načítání závislostí, kdy se po asynchronním zavolání předají **jednotlivé třídy a objekty** v odpovídajícím pořadí. V ukázce se načítají základní moduly pro práci s mapou a scénou:

- **Map** – kořenový objekt mapy (spravuje podkladové mapy a vrstvy),
- **SceneView** – vykreslování 3D scény a objektů,
- **FeatureLayer** – přístup k vektorovým prvkům,

uživatelské widgety

- **Home** – návrat kamery do výchozí pozice.
- **BasemapGallery** – přepínání podkladových map,
- **Expand** – rozbalování a sbalování widgetů,
- **Legend** – zobrazení legendy,

a 3D kartografické znaky

- **ObjectSymbol3DLayer** – ovládání 3D objektů,
- **PointSymbol3D** – kontejner 3D kartografických znaků pro bodové prvky.

```
document.addEventListener("DOMContentLoaded", function() {
  require([
    "esri/Map",
    "esri/views/SceneView",
    "esri/layers/FeatureLayer",
    "esri/widgets/Home",
    "esri/widgets/BasemapGallery",
    "esri/widgets/Expand",
    "esri/widgets/Legend",
    "esri/symbols/ObjectSymbol3DLayer",
    "esri/symbols/PointSymbol3D"
  ], function(Map, SceneView, FeatureLayer, Home, BasemapGallery, Expand, Legend,
    ObjectSymbol3DLayer, PointSymbol3D) {
```

Nejprve je vytvořen objekt **Map**, který využívá **topografickou podkladovou mapu** a **globální digitální model reliéfu** (`ground: "world-elevation"`). Na tuto mapu je přidána **vektorová vrstva** **FeatureLayer** obsahující **vybrané státy Evropy**, publikovaná jako **služba v ArcGIS Online**. Vrstva umožňuje zobrazovat atributy prostřednictvím pop-up okna (název státu a hodnota teploty). Pro zvýraznění jsou použity 3D popisky (`labelingInfo`), které zobrazují názvy států tučným písmem se světlým halo. Znakový klíč vrstvy je definován jednoduchým rendererem (`type: "simple"`), kde základním symbolem je **3D objekt ve tvaru válce**. Vzhled symbolu je dále odvozen od hodnot atributu **Temperature** prostřednictvím grafických proměnných (`visualVariables`). Používají se čtyři typy: barevná škála (`color`), průhlednost (`opacity`), extruze (`size, axis: "height"`) a velikost – tloušťka (`size, axis: "width-and-depth"`). Nakonec je specifikováno, že vrstva je zobrazována relativně k terénu (`elevationInfo: { mode: "relative-to-ground" }`), což znamená, že se diagramy nacházejí přímo na povrchu reliéfu. Vrstva je **přidána do mapy** příkazem `map.add(euGraduatedSymbolsLayer);`, čímž se stává součástí scény.

```
const map = new Map({ basemap: "topo-vector", ground: "world-elevation" });

const euGraduatedSymbolsLayer = new FeatureLayer({
  url: "https://services1.arcgis.com/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_3D_graduated/FeatureServer/0",
  outFields: ["*"], visible: true, title: "3D Graduated Symbols",
  popupTemplate: { title: "{NAME}", content: "Temperature: {Temperature}<br>" },
  labelingInfo: [{
```

```

        labelExpressionInfo: { expression: "$feature.NAME" },
        symbol: { type: "label-3d", symbolLayers: [{ type: "text",
            material: { color: "#646464" }, size: 10, halo:
                { color: "white", size: 1 }, font: { weight: "bold" } } ] }
    }],
    renderer: {
        type: "simple",
        symbol: { type: "point-3d", symbolLayers: [{ type: "object",
            resource: { primitive: "cylinder" }, material: { color: "white" },
            width: 80000 } ] },
        visualVariables: [
            { type: "color", field: "Temperature", stops: [{ value: 269, color:
                "#4575b4" }, { value: 277, color: "#ffffbf" }, { value: 286,
                color: "#d73027" } ] },
            { type: "opacity", field: "Temperature", stops: [{ value: 269, opacity: 1 },
                { value: 288, opacity: 1 } ] },
            { type: "size", field: "Temperature", axis: "height", stops: [{ value: 269,
                size: 0 }, { value: 286, size: 500000 } ] },
            { type: "size", axis: "width-and-depth", useSymbolValue: true }
        ]
    },
    elevationInfo: { mode: "relative-to-ground", offset: 0 }
});

map.add(euGraduatedSymbolsLayer);

```

Objekt `SceneView` definuje způsob, jakým se mapa **vykresluje ve 3D prostředí** a jak s ní může **uživatel interagovat**. Parametr `container: "viewDiv"` určuje HTML prvek, do něhož se scéna vloží. Propojení s mapou je zajištěno parametrem `map`. Kamera je inicializována s pohledem na Evropu (`latitude: 48`, `longitude: 15`) ve výšce 15 000 kilometrů, bez náklonu (`tilt: 0`) a s neutrálním natočením (`heading: -1`). Dále jsou nastaveny omezení interakce, kdy je explicitně povolena **rotace scény** (`rotationEnabled: true`). Volba `qualityProfile: "high"` zajišťuje vykreslování ve vyšší kvalitě (více detailů, plynulejší stíny a textury), i za cenu vyšších nároků na výkon.

```

const view = new SceneView({
    container: "viewDiv", map,
    camera: { position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 15000000 }, tilt: 0,
        heading: -1 },
    constraints: { rotationEnabled: true },
    qualityProfile: "high"
});

```

Do uživatelského rozhraní scény jsou přidány **interaktivní widgety**, které usnadňují práci s mapou. V levé části se nachází tlačítko umožňující **návrat kamery do výchozího pohledu**. Stejně tak je zde umístěna **galerie podkladových map**. V levém dolním rohu je obdobným způsobem umístěna **legenda**. Widgety využívají modul `Expand`, díky němuž jsou standardně skryté a zobrazí se až po rozbalení, což přispívá k přehlednosti uživatelského rozhraní.

```

view.ui.add(new Home({ view }), "top-left");
const bg = new BasemapGallery({ view });
view.ui.add(new Expand({ view, content: bg, expandIconClass:
    "esri-icon-basemap" }), "top-left");
const legend = new Legend({ view, layerInfos: [{ layer: euGraduatedSymbolsLayer,
    title: "3D Graduated Symbols" } ] });
view.ui.add(new Expand({ view, content: legend, expandIconClass:
    "esri-icon-legend" }), "bottom-left");

```

Pomocí metody `document.getElementById()` jsou do proměnných načteny odkazy na jednotlivé prvky bočního panelu, které slouží k **interaktivní úpravě znakového klíče**. Jedná se o **výběr barev** (`startColorPicker`, `middleColorPicker`, `endColorPicker`), **posuvník průhlednosti** (`transparencyInput`), ovladače pro nastavení **minimálního a maximálního vertikálního posunu symbolů** (`minZOffsetInput`, `maxZOffsetInput`), **náhled barevné škály** (`colorRampPreview`), vstup pro **výšku symbolů nad terénem** (`heightAboveGroundInput`) a **průměr symbolů** (`diameterInput`). Specifický je také prvek `shapeSelect`, který umožňuje **volbu tvaru symbolu** (např. válec, jehlan, kužel). Tyto prvky tvoří základ ovládacího panelu a umožňují uživateli přizpůsobit znakový klíč v reálném čase.

```
const startColorPicker = document.getElementById("startColorPicker");
const middleColorPicker = document.getElementById("middleColorPicker");
const endColorPicker = document.getElementById("endColorPicker");
const transparencyInput = document.getElementById("transparencyInput");
const minZOffsetInput = document.getElementById("minZOffsetInput");
const maxZOffsetInput = document.getElementById("maxZOffsetInput");
const colorRampPreview = document.getElementById("colorRampPreview");
const heightAboveGroundInput = document.getElementById("heightAboveGroundInput");
const diameterInput = document.getElementById("diameterInput");
const shapeSelect = document.getElementById("shapeSelect");
```

Pomocí `document.getElementById()` jsou načteny prvky sloužící k **ovládání nápovědy**. Proměnná `helpButton` odkazuje na tlačítko s ikonou otazníku v záhlaví aplikace. `HelpOverlay` představuje překryvnou vrstvu (tmavé pozadí), která se zobrazí při otevření nápovědy a zároveň umožňuje její zavření kliknutím mimo okno. Samotný obsah nápovědy je uložen v elementu `helpModal`, jenž obsahuje **popis ovládání a tiráž**. `CloseHelpModalBtn` reprezentuje křížek v pravém horním rohu okna nápovědy.

```
const helpButton = document.getElementById("helpButton");
const helpOverlay = document.getElementById("helpModalOverlay");
const helpModal = document.getElementById("helpModal");
const closeHelpModalBtn = document.getElementById("closeHelpModal");
```

Konstanty `TEMP_MIN`, `TEMP_MID` a `TEMP_MAX` představují **referenční hodnoty atributu teploty**, které slouží k **definici barevné škály** (nízké, střední a vysoké hodnoty). Proměnná `booting` signalizuje, zda je aplikace v počáteční fázi načítání, a podle toho se omezuje spouštění některých funkcí. Funkce `updateColorRampPreview()` generuje **vizuální náhled barevné škály** v bočním panelu – z definovaných hodnot (`stops`) sestaví CSS přechod (`linear-gradient`) a aplikuje jej na prvek `colorRampPreview`. Funkce `updatePreviewFromInputs()` vytváří seznam hodnot na základě aktuálně zvolených a předává je k vykreslení náhledu. Pro omezení zátěže je použita funkce `debounce()`, která zajišťuje, že vyvolaná akce se provede až po krátké prodlevě (defaultně 100 ms) a opakované rychlé změny tak nespustí nadbytečné vykreslovací operace.

```
const TEMP_MIN = 269, TEMP_MID = 277, TEMP_MAX = 286;
let booting = true;

function updateColorRampPreview(stops) {
  if (!colorRampPreview) return;
  const colors = stops.map(s => s.color && s.color.toHex ? s.color.toHex() :
                                s.color);
  colorRampPreview.style.background = `linear-gradient(to right,
                                                        ${colors.join(", ")} `;
}

function updatePreviewFromInputs() {
```

```

updateColorRampPreview([
  { value: TEMP_MIN, color: startColorPicker?.value || "#4575b4" },
  { value: TEMP_MID, color: middleColorPicker?.value || "#ffffbf" },
  { value: TEMP_MAX, color: endColorPicker?.value || "#d73027" }
]);
}
function debounce(fn, d = 100) { let t; return (...a) => { clearTimeout(t);
  t = setTimeout(() => fn(...a), d); }; }

```

Následující kód řeší **konstrukci 3D symbolu** a **sestavení rendereru** podle aktuální volby uživatele. Funkce `buildPoint3DSymbol(primitive, diameter)` vytvoří vnitřní `ObjectSymbol3DLayer` se zadaným tvarem a pevnou šířkou / hloubkou, a vrátí ho zabalený v `PointSymbol3D`. Funkce `buildRenderer(base)` nejprve naklonuje vstupní renderer, ze vstupů UI načte požadovaný tvar a průměr symbolu a nastaví nově postavený 3D symbol (`r.symbol = ...`). Následně vyhledá grafickou proměnnou pro barvu (`type: "color"`) navázanou na atribut `Temperature` a nastaví tři hodnoty podle konstant `TEMP_MIN`, `TEMP_MID` a `TEMP_MAX` a aktuálně zvolených barev. Stejným způsobem vyhledá grafickou proměnnou pro výšku (`type: "size", axis: "height"`) a převezme hodnoty z `minZOffsetInput` a `maxZOffsetInput`. Šířka a hloubka symbolu zůstávají řízeny parametrem `diameter`, zatímco výška se extruduje podle atributu. Funkce vrátí hotový renderer připravený k přiřazení vrstvě.

```

function buildPoint3DSymbol(primitive, diameter) {
  const obj = new ObjectSymbol3DLayer({
    resource: { primitive },
    material: { color: "white" },
    width: diameter,
    depth: diameter
  });
  return new PointSymbol3D({ symbolLayers: [obj] });
}

function buildRenderer(base) {
  const r = base.clone();
  const prim = String(shapeSelect?.value || "cylinder").toLowerCase();
  const diam = Number(diameterInput?.value) || 80000;
  r.symbol = buildPoint3DSymbol(prim, diam);

  let colorVV = r.visualVariables.find(v => v.type === "color");
  if (!colorVV) { colorVV = { type: "color", field: "Temperature", stops: [] };
    r.visualVariables.push(colorVV); }
  colorVV.field = "Temperature";
  colorVV.stops = [
    { value: TEMP_MIN, color: startColorPicker?.value || "#4575b4" },
    { value: TEMP_MID, color: middleColorPicker?.value || "#ffffbf" },
    { value: TEMP_MAX, color: endColorPicker?.value || "#d73027" }
  ];

  let sizeH = r.visualVariables.find(v => v.type === "size" && v.axis === "height");
  if (!sizeH) { sizeH = { type: "size", axis: "height", field: "Temperature",
    stops: [] }; r.visualVariables.push(sizeH); }
  const minH = Number(minZOffsetInput?.value) || 0;
  const maxH = Number(maxZOffsetInput?.value) || 500000;
  sizeH.field = "Temperature";
  sizeH.stops = [{ value: TEMP_MIN, size: minH }, { value: TEMP_MAX, size: maxH }
  ];

  return r;
}

```

Funkce `applyAll()` představuje **centrální proceduru**, která nastavuje renderer a další parametry vrstvy podle **aktuálních vstupů uživatele**. Pokud je aplikace ještě ve fázi spouštění, funkce se neprovede. V opačném případě je vrstvě `euGraduatedSymbolsLayer` přiřazen nový renderer vytvořený pomocí funkce `buildRenderer()`. Dále se nastaví globální **průhlednost** (`opacity`) podle hodnoty posuvníku a případný vertikální posun vrstvy nad terénem (`elevationInfo.offset`) podle vstupu `heightAboveGroundInput`.

```
function applyAll() {
  if (booting) return;
  euGraduatedSymbolsLayer.renderer =
    buildRenderer(euGraduatedSymbolsLayer.renderer);
  const op = Number(transparencyInput?.value);
  euGraduatedSymbolsLayer.opacity = Number.isFinite(op) ? op : 1;
  const offset = Number(heightAboveGroundInput?.value);
  euGraduatedSymbolsLayer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground",
    offset: Number.isFinite(offset) ? offset : 0 };
}

const applyWithPreviewDebounced = debounce(() => {
  updatePreviewFromInputs();
  if (!booting) applyAll();
}, 100);
```

Poté je volána funkce `updatePreviewFromInputs()`, která inicializuje **barevný náhled**. Následují dvě pomocné funkce – `openHelp` a `closeHelp` – které mění vlastnosti prvku `helpOverlay`. Tyto funkce jsou pak svázány s událostmi uživatelského rozhraní: kliknutí na tlačítko nápovědy (`helpButton`) otevře okno, kliknutí na křížek (`closeHelpModalBtn`) nebo na prázdnou část překryvu (`helpOverlay`) jej zavře. Navíc je nápovědu možné ukončit klávesou „Escape“.

```
updatePreviewFromInputs();
const openHelp = () => { if (!helpOverlay) return; helpOverlay.style.display =
  "flex"; helpOverlay.setAttribute("aria-hidden", "false"); };
const closeHelp = () => { if (!helpOverlay) return; helpOverlay.style.display =
  "none"; helpOverlay.setAttribute("aria-hidden", "true"); };
helpButton?.addEventListener("click", e => { e.preventDefault(); openHelp(); });
closeHelpModalBtn?.addEventListener("click", e => { e.preventDefault();
  closeHelp(); });
helpOverlay?.addEventListener("click", e => { if (e.target === helpOverlay)
  closeHelp(); });
window.addEventListener("keydown", e => { if (e.key === "Escape") closeHelp(); });
helpModal?.addEventListener("click", e => e.stopPropagation());
```

Pomocí metody `addEventListener()` jsou jednotlivým prvkům bočního panelu přiřazeny **posluchače událostí**. Při každé změně hodnoty se spouští funkce `updatePreviewFromInputs()` a/nebo `applyWithPreviewDebounced()`. První z nich okamžitě aktualizuje grafický náhled barevné škály, druhá pak s krátkým zpožděním **aplikuje nový znakový klíč do scény**. Díky tomu se všechny uživatelské úpravy promítají do vizualizace bez nutnosti dalšího potvrzení. Tento mechanismus zajišťuje interaktivitu v reálném čase a zároveň chrání aplikaci před přetížením nadměrným počtem vykreslovacích operací.

```
startColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
  applyWithPreviewDebounced(); });
middleColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
  applyWithPreviewDebounced(); });
endColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
```

```

        applyWithPreviewDebounce(); });
transparencyInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
minZOffsetInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
maxZOffsetInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
heightAboveGroundInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
diameterInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
shapeSelect?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
shapeSelect?.addEventListener("change", applyWithPreviewDebounce);

```

Metoda `view.when()` spouští asynchronní blok kódu **po úplném načtení scény**. Nejprve se pomocí `view.whenLayerView(euGraduatedSymbolsLayer)` ověří, že je tematická vrstva připravena k vykreslení. Následuje **plynulý přesun kamery** (`view.goTo`) do definované pozice, přičemž animace trvá 5 sekund. Po dokončení přiblížení je proměnná `booting` nastavena na hodnotu `false`, čímž se odblokuje plná funkcionálnost aplikace, a je vyvolána funkce `applyAll()`, která aplikuje aktuální nastavení znakového klíče. Tento postup zajišťuje, že se vizualizace spustí až po načtení dat a dokončení úvodního „fly-in“ efektu.

```

view.when(async () => {
  await view.whenLayerView(euGraduatedSymbolsLayer).catch(() => {});
  try {
    await view.goTo({ position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 6000000 },
                        tilt: 0, heading: -1 }, { duration: 5000 });
  } catch (e) {}
  booting = false;
  applyAll();
});});});

```

7.2.3 Testování použitelnosti prototypu

Prototyp 3D geovizualizačního prostředí byl **otestován z hlediska použitelnosti** v rámci disertační práce Tomáše Vaníčka s názvem *Hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking* (Vaníček, n.d.). Hlavním cílem bylo ověřit, **jak uživatelé s prostředím interagují, a identifikovat případné bariéry** snižující celkový uživatelský zážitek. Výzkum využíval kombinaci **eye-trackingu** (obr. 64), **logování interakcí** přes vlastní klientský nástroj **MapLogger** a **dotazníkové šetření**. Dotazníkové šetření zahrnovalo standardizovaný nástroj **UEQ** (User Experience Questionnaire) a doplňující sekci zaměřenou na subjektivní hodnocení a demografické charakteristiky. Experimentu se zúčastnilo **54 participantů**, přičemž výzkumný vzorek byl tvořen převážně mladšími uživateli a největší zastoupení měla věková kategorie do 30 let. Testování se skládalo z **pěti úloh** (tab. 19). První fáze zahrnovala volnou exploraci aplikace bez časového limitu. Následující čtyři úlohy byly cílené a ověřovaly schopnost uživatelů vyhledávat hodnoty, porovnávat data a upravovat znakový klíč u specifických vizualizačních metod.

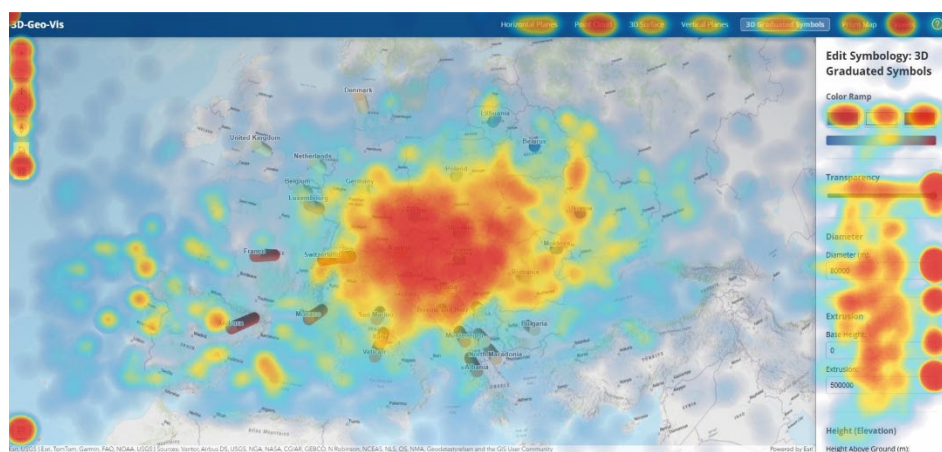
Tab. 19: Zadání pěti úloh pro eye-tracking testování použitelnosti aplikace 3D-Geo-Vis (Vaníček, n.d.)

ID úlohy	Zadání úlohy
Task 1	Volně si prohlédněte a prozkoumejte aplikaci. Zkuste zjistit, jaké nabízí možnosti a jak se v ní orientujete. Cílem je seznámit se s rozhraním a ovládáním.
Task 2	Najděte vizualizaci „Point Cloud“ a zjistěte, jaká je nejvyšší hodnota teploty, kterou tato vizualizace zobrazuje.
Task 3	Přejděte na vizualizaci „3D Graduated Symbols“. Změňte tvar symbolů a následně upravte také jejich průměr (velikost).
Task 4	Zvolte vizualizaci „Voxels“ a zjistěte rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou teploty.
Task 5	Vyberte vizualizaci, která se Vám líbí nejvíce. Upravte barevné schéma tak, aby se Vám výsledek vizuálně líbil ještě více.

Z hlediska uživatelské zkušenosti vykazuje aplikace podle standardizovaného hodnocení UEQ **převážně neutrální až mírně pozitivní profil**. Aplikace byla vnímána jako poměrně srozumitelná a předvídatelná, což reflektují relativně **vysoká skóre** u škál **Přehlednost** a **Spolehlivost**. Naopak **nejproblematictější** dimenzí se ukázala být **Účinnost**, jejíž hodnocení bylo výrazně zatíženo negativním vnímáním rychlosti a plynulosti systému. Z interakčních dat nástroje MapLogger vyplývá, že uživatelé preferují **standardní navigační operace**. Naprostou většinu interakcí tvořilo používání levého tlačítka myši a posun kolečkem pro změnu měřítka. **Nejvyšší kognitivní** a interakční zátěž byla zaznamenána **během první explorativní úlohy**. V pozdějších úlohách s jasně definovaným postupem došlo k výraznému poklesu počtu interakcí, což indikuje rychlý nástup efektu učení.

Během testování se ukázalo, že uživatelé měli při navigaci v 3D prostoru tendenci aplikovat **strategie typické pro 2D mapy**. Často pracovali v **zobrazení "shora"** a konkrétní hodnoty zjišťovali primárně prostřednictvím **klikání do mapy** nebo **čtením z legendy**, místo aby plně využívali potenciál odečítání informací na výškové ose Z. Volná orientace ve scéně navíc mnohdy vedla k **navigačním extrémům**. Někteří uživatelé přibližovali mapu do detailů na úroveň obcí, což nebylo pro interpretaci jevu účelné, nebo prudce rotovali s glóblem do úhlů, které znesnadňovaly čtení tematického obsahu a způsobovaly dezorientaci. Další bariérou byla **objevitelnost některých prvků rozhraní**; během úvodní explorace část uživatelů **přehlédla horní menu** pro přepínání vizualizačních metod a zůstala u výchozí metody. Zároveň se ukázalo, že sekundární komponenty, jako je rozsáhlý seznam podkladových map, mohou odvádět pozornost od hlavního cíle aplikace, protože v nich uživatelé trávili zbytečně mnoho času. Vyskytly se také dílčí interakční a sémantické nejasnosti. K těm patřilo **matoucí chování dialogu pro výběr barev**, který neukládal změny při prostém zavření okna křížkem, ale vyžadoval potvrzení tlačítkem "OK", a také **jazyková bariéra** u pojmu "diameter" při úpravě velikosti symbolů.

Na základě zjištěných výsledků byla formulována **sada doporučení** pro další rozvoj aplikace. Primárním cílem je **optimalizace výkonu** a zrychlení načítání u výpočetně náročných metod, jako je vizualizace Voxels. Zásadní je v těchto případech také **transparentní systémová komunikace stavu** načítání směrem k uživateli. Dále se doporučuje implementovat technická omezení pro minimální a maximální rozsah zoomu a nastavit prostorové mantinely pro manipulaci se scénou, aby se předešlo ztrátě kontextu a dezorientaci. Uživatelské rozhraní vyžaduje **posílení vizuální hierarchie** primárních navigačních prvků, zejména menu pro volbu metod, a naopak potlačení rozptylovačů v podobě nadbytečného počtu podkladových map. Pravý panel pro parametrizaci znakového klíče by měl získat jasně definované limity a **doporučené výchozí hodnoty**.



Obr. 64: Rozložení uživatelských interakcí na základě metody eye-tracking (Vaníček, n.d.)

8 GEOVIZUALIZAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO VIZUÁLNÍ ANALÝZU VE 3D

Výsledky **testování použitelnosti** a **zjištění z předchozích dílčích cílů** poukazují na to, že návrh finální aplikace pro vizualizaci metod 3D geovizualizace musí **cíleně reagovat na zjištěné nedostatky**. Pouze tak lze při vizuální analýze dosáhnout požadované **efektivity** a **uživatelské přívětivosti**. Takovéto geovizualizační prostředí představuje **plně interaktivní systém**, jenž v rámci jednotného interakčního přístupu integruje **více vizualizačních metod**, a úspěšně tak překonává omezení prvotního prototypu.

Zásadním požadavkem na design cílového prostředí je **priorita výpočetního výkonu a efektivity**. Výsledky uživatelského testování opakovaně poukázaly na to, že největší slabinou byla nedostatečná rychlost, plynulost a vysoká latence při vykreslování dat (a to především u metody voxelů). Finální aplikace proto musí projít důslednou **optimalizací**, která zaručí plynulou interakci jak při navigaci ve 3D scéně, tak při úpravách grafických proměnných. Tato optimalizace je zcela klíčová pro **snížení kognitivní zátěže uživatele**, pro eliminaci rizika prostorové dezorientace a pro podporu efektivních postupů při vizuální analýze.

Dalším nezbytným předpokladem je začlenění **intuitivního a flexibilního uživatelského rozhraní** s optimalizovaným rozložením prvků, které **usnadní orientaci a rozšíří možnosti kontroly nad aplikací**. Mezi stěžejní vylepšení patří odstranění problému s nepřehledným přepínáním vizualizačních metod. Toho musí být dosaženo integrací centrálního ovládacího panelu, který umožní simultánní kombinování různých metod, datových vrstev a grafických proměnných, čímž se překoná hlavní omezení původního prototypu rozděleného do dílčích oken. Pro plnohodnotnou podporu vizuální analýzy je dále kritické, aby prostředí umožňovalo **nahrávání vlastních uživatelských dat**, volbu konkrétních **atributů** k vizualizaci a efektivní správu obsahu prostřednictvím **správy vrstev**. V neposlední řadě je nutné minimalizovat chyby v interakci. To vyžaduje implementaci okamžité vizuální odezvy (např. při změně znakového klíče) a formulaci srozumitelnějších sémantických popisků u specifických parametrů jednotlivých metod. Tím se prokazatelně eliminuje nežádoucí interakce metodou „pokus-omyl“, k níž dříve docházelo například při nastavování velikosti průměru symbolů.

8.1 Popis aplikace 3D-Geo-Vis 2.0

Na základě výsledků uživatelského testování a s ohledem na identifikované nedostatky prvotního prototypu byla vyvinuta **finální webová aplikace 3D-Geo-Vis 2.0**. Jejím hlavním cílem je zprostředkovat **efektivní vizuální analýzu tematických prostorových 3D dat** v uživatelsky přívětivém a intuitivním prostředí. Kompletní **zdrojové kódy** jsou volně k dispozici v repositáři na platformě GitHub (https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2) a samotná aplikace je veřejně přístupná na adrese: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2. Oproti původnímu prototypu byla aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 **rozšířena o následující klíčové funkcionality**:

- **Přidávání vlastních dat** z platformy ArcGIS Online prostřednictvím URL odkazu na konkrétní vrstvu, a to včetně tematických dat, výškových modelů či 3D modelů budov.
- **Vizualizaci dat pomocí sedmi metod 3D geovizualizace** – horizontální roviny, mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny, 3D kartodiagramy (bodové či sloupcové), 3D kartogramy a voxely.
- **Úpravu grafických proměnných v reálném čase** s ohledem na specifikum zvolené metody.
- **Volbu atributů** pro tematickou vizualizaci a generování popisků.

- **Správu vrstev**, která uživateli umožňuje jednoduše přepínat viditelnost vrstev, otevírat panel pro úpravu znakového klíče nebo vrstvu z prostředí odstranit.
- **Simultánní kombinování** různých datových sad, vizualizačních metod a parametrů grafických proměnných v rámci jednoho integrovaného prostředí.
- **Automatické přiblížení na rozsah** (zoom to extent) konkrétní vrstvy bezprostředně po nahrání dat.
- **Sdílení aktuálního stavu 3D geovizualizační scény** (včetně veškerých nastavení) prostřednictvím vygenerovaného unikátního URL odkazu.

Nad rámec samotného 3D prostředí byla vytvořena doprovodná webová stránka, která detailně popisuje **využité metody 3D geovizualizace** a specifikuje **grafické proměnné** implementované v aplikaci 3D-Geo-Vis 2.0. Tento podpůrný prvek uživatelům výrazně usnadňuje a urychluje počáteční seznámení s uživatelským prostředím i celkovou metodikou navrženého řešení.

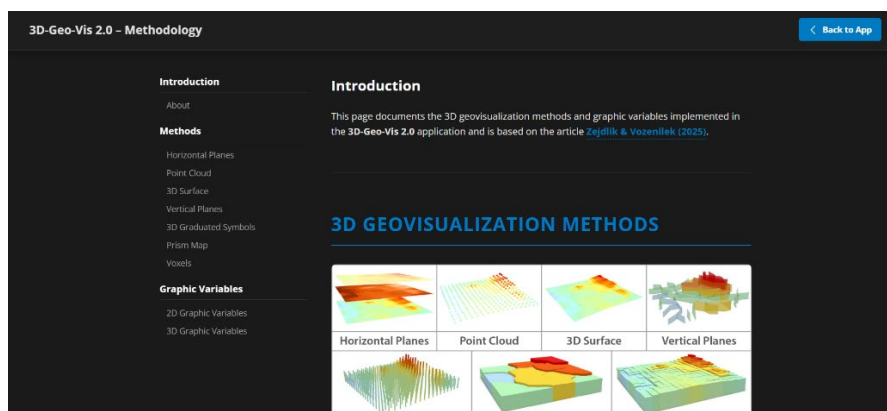
Základem aplikace je mapové okno zobrazující **virtuální glóbus ve 3D scéně** (obr. 65). Na rozdíl od prototypu nejsou jednotlivé metody zpracované jako samostatné stránky, ale veškerá vizualizační logika je **implementována v rámci jedné stránky**. Základní widgety (zoom, pan, návrat do počátečního pohledu, podkladové mapy, legenda) zůstaly na stejném místě v levé části aplikace. V pravém dolním rohu je **seznam aktivních vrstev**, které je možné skryt, upravit nebo smazat. Panel pro úpravu znakového klíče je primárně zavřený, a k jeho otevření dojde až při nahrání dat a volbě metody vizualizace.



Obr. 65: Aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 – příklad 3D kartodiagramů

Pro **přidávání tematických dat** slouží tlačítko „Add Thematic Layer“. Po vložení URL odkazu na ArcGIS Online Feature Layer je **rozpoznán její datový typ** a uživateli jsou nabídnuty metody 3D geovizualizace podporované pro daný typ. Po volbě metody je možné **upravovat v reálném čase grafické proměnné**. Aplikace zároveň pomocí algoritmu **analyzuje prostorový rozsah** (bounding box) nahraných dat a automaticky vypočítá **optimální výchozí parametry pro vizualizaci** (např. výšku extruze nebo velikost bodů). Tím se zajišťuje, že vizualizace je okamžitě čitelná bez ohledu na to, zda data pokrývají jedno město, nebo celý kontinent. Pomocí tlačítka „Add 3D Buildings“ je možné **přidat 3D budovy**, u kterých lze upravovat barvu, průhlednost a hrany. Další funkcionalitou je „Change Elevation Layer“, která umožňuje **změnit vrstvu pro vykreslení výškopisu**. U všech vrstev je možné změnit jejich název, který se zobrazuje v seznamu vrstev. Zde je také u každé vrstvy uvedeno, o jakou metodu vizualizace se jedná, což slouží k lepší přehlednosti při vizualizaci většího množství vrstev.

Dalším důležitým tlačítkem je „Copy Share Link“, díky kterému je možné **sdílet aktuální stav** 3D geovizualizačního prostředí **pomocí URL odkazu**. Díky logice sdílení jsou zachovány například nahrané vrstvy včetně jejich parametrů grafických proměnných nebo aktuální zoom a natočení. Následuje tlačítko je „Help“, kde je dostupný **odkaz na metodiku aplikace** (obr. 66) věnující se použitým metodám a grafickým proměnným, **návod pro práci s aplikací, ukázková (demo) data** a údaje o autorovi. Posledním tlačítkem je „Feedback“, kde mohou uživatelé zaslat zpětnou vazbu formou emailu.



Obr. 66: Metodologie aplikace popisující metody 3D geovizualizace a grafické proměnné

Na základě zjištění z **dotazníku uživatelské zkušenosti** (User Experience Questionnaire) byla do finální verze aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 **zpracována řada klíčových připomínek**. Nedostatečná nápadnost přepínání metod byla vyřešena upuštěním od prototypu s oddělenými stránkami a přechodem k **integrovanému uživatelskému rozhraní**. Nový design implementuje centrální systém, který umožňuje simultánní kombinování a přepínání mezi **různými vizualizačními metodami, datovými vrstvami a grafickými proměnnými**, čímž se proces výběru metody stává výraznějším a intuitivnějším.

Přílišná fixace pozornosti na boční panel, která dříve vedla k přehlížení globální struktury rozhraní (jako jsou ovládací prvky vpravo nahoře), byla rovněž eliminována tímto přechodem ke sjednocenému prostředí. Díky **centralizaci ovládacích prvků**, včetně nového **správce vrstev**, a detailní optimalizaci rozhraní působí celkové prostředí mnohem vyváženěji. Uživatelská pozornost tak již není neúměrně strhávána pouze k úpravám dílčích parametrů. Dalším významným bodem byly **výkonnostní limity** u některých typů vizualizací, zejména u voxelů. Tuto komplikaci nebylo možné zcela eliminovat, neboť je přímo závislá na využití technologii, na prostorovém rozsahu a datovém objemu, rychlosti internetového připojení a dalších externích faktorech. Při přípravě dat pro vizualizaci ve webovém prostředí je tedy nezbytné dbát na jejich přísnou **optimalizaci** za účelem zrychlení načítání. Konkrétně u voxelů lze celkový počet vykreslovaných prvků **efektivně redukovat** například **zvětšením velikosti buňky**.

8.2 Architektura aplikace

Pro vývoj finálního 3D geovizualizačního prostředí (3D-Geo-Vis 2.0) byla podobně jako v případě prototypu zvolena technologie **ArcGIS Maps SDK for JavaScript** ve verzi 4.29. Využití JavaScriptového SDK umožnilo **plnou kontrolu manipulace** s prostorovými daty, flexibilní tvorbu **grafického uživatelského rozhraní (GUI)** a zajištění **plynulého vykreslování 3D scén v reálném čase** přímo ve webovém prohlížeči pomocí technologie WebGL. Ačkoliv se může **závislost na technologiích Esri** jevit jako omezující, jedná se o **dominantní platformu** na poli geografických informačních systémů, přičemž práce svým **metodologickým přínosem** může posouvat její hranice.

Základní datový tok aplikace funguje na **principu klient-server**. Prostorová data jsou nejprve publikována jako **webové vrstvy** (Feature Layer, Scene Layer, Elevation Layer) na cloudové platformě ArcGIS Online (AGOL). Toto online prostředí slouží jako **spolehlivý datový sklad a server** poskytující data prostřednictvím REST API. Aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 následně funguje jako **interaktivní webový klient**, do kterého lze vrstvy z AGOL dynamicky přidávat prostřednictvím jejich **unikátních URL adres**. Architektura aplikace je navržena tak, aby podporovala **tři základní úrovně přidávání dat**:

- **Tematická data:** Samotná analyzovaná data, na která jsou aplikovány 3D geovizualizační metody.
- **Budovy:** Modely městské zástavby, resp. 3D budov, které dodávají scéně urbánní a prostorový kontext.
- **Terén (výškopis):** 3D povrch, kterým lze znázornit skutečný terén (DMR či DMP), nebo jej využít pro vizualizaci tematických (rastrových) dat.

Při **nahrávání tematických vrstev** má uživatel na výběr ze **sedmi vizualizačních metod** (viz kap. 5.2 a 6). Po nahrání dat se uživatelské rozhraní **dynamicky přizpůsobí** a nabídne pouze ty možnosti úpravy grafických proměnných, které jsou **pro danou metodu relevantní**. Zásadní výhodou řešení je podpora dynamické symboliky definované na základě atributů, což umožňuje v reálném čase měnit parametry (grafické proměnné) znaků přímo na základě aktuálních dat a jejich hodnot. Z hlediska celkové struktury se 3D geovizualizační prostředí skládá ze **čtyř na sebe navazujících a vzájemně komunikujících komponent**:

- **Virtuální glóbus (3D scéna):** Představuje hlavní zobrazovací část aplikace (třída SceneView v ArcGIS API). Slouží jako 3D prostorový kontext pro vykreslování mapových vrstev. Umožňuje uživateli plynulou navigaci, rotaci a změnu úhlu pohledu na vizualizovaná data.
- **Uživatelské rozhraní (UI):** Tvoří komunikační most mezi uživatelem a aplikací a je navrženo s důrazem na efektivní kompozici ovládacích prvků. Skládá se z postranních a plovoucích panelů (vytvořených pomocí HTML a CSS), které uživateli zpřístupňují veškerou funkcionalitu bez nutnosti opouštět kontext 3D scény.
- **Správce vrstev (Layer Management):** Modul starající se o hierarchii dat ve scéně. Uchovává informace o všech načtených datech (tematické vrstvy, budovy) a poskytuje uživateli nástroje pro jejich organizaci – přepínání viditelnosti, odstraňování nepotřebných vrstev a otevření úprav znakového klíče pro konkrétní vrstvu.
- **Ovládání grafických proměnných:** Nejdůležitější interaktivní komponenta pro vizuální analýzu. Modul zpracovává uživatelské vstupy (např. hodnoty, posuvníky, výběry z menu) a v reálném čase překresluje vykreslovací jádro vrstvy (renderer). Uživatel tak může okamžitě pozorovat změny barevných stupnic, průhlednosti, výšky či velikosti znaků, což zásadně podporuje efektivitu explorační vizuální analýzy.

8.3 Popis vybraných částí kódu

Základním principem vývoje bylo vytvoření lehké, responzivní a na straně klienta běžící webové aplikace, která striktně odděluje strukturu, vizuální prezentaci a aplikační logiku:

- **index.html a style.css:** Tvoří grafické uživatelské rozhraní (GUI) hlavní aplikace. Rozhraní je postaveno na moderních CSS principech (Flexbox, Grid) s využitím CSS proměnných pro snadnou správu grafiky.
- **main.js:** Obsahuje veškerou aplikační logiku, obsluhu událostí a propojení s mapovým API.

- **methods.html a methods.css:** Představují samostatný modul teoretické dokumentace. Jsou koncipovány jako statická stránka s interaktivními prvky (např. tooltipy pro citace), která slouží jako most mezi praktickou implementací a teoretickým rámcem (metodikou) disertační práce.

Níže jsou popsány nejdůležitější části kódu **main.js**, který zajišťuje veškerou funkcionalitu aplikace. Knihovna **ArcGIS Maps SDK for JavaScript** je do aplikace načítána asynchronně pomocí AMD (Asynchronous Module Definition) architektury, konkrétně prostřednictvím funkce **require**, což optimalizuje načítání pouze těch modulů, které jsou aktuálně potřeba. Třídy **Map** a **SceneView** tvoří absolutní základ pro veškerou vizualizaci, podobně jako v případě prototypu. Třída **SceneView** je instancována s parametrem **qualityProfile: "high"**, což zajišťuje maximální možnou vizuální kvalitu 3D scény. Aplikace dynamicky načítá prostorová data z poskytnutých URL adres. Pro vektorová tematická data se využívá **FeatureLayer**, pro 3D modely budov slouží **SceneLayer** a pro úpravu 3D povrchu je implementována třída **ElevationLayer**. Pro správné nastavení vizualizace (např. nastavení barevných škál nebo velikostí na minimální a maximální hodnoty) je využíván modul **summaryStatistics**, který asynchronně počítá statistické parametry zadaného atributového pole.

Modulární definice vizualizačních metod

Jádrem vizualizační logiky je centrální konfigurační objekt **visualizationMethods**. Tento objekt pro každou metodu (např. 3D kartogram) definuje její **kompatibilitu s geometrií dat**, dynamicky generuje **uživatelské rozhraní** pro úpravu grafických proměnných a obsahuje deklarativní předpisy pro tvorbu 3D rendererů pomocí ArcGIS API. Tento přístup **usnadňuje budoucí rozšiřování aplikace** o nové metody.

Objekt nejprve definuje **základní metadata**, včetně omezení kompatibility výhradně na polygonovou geometrii (**compatibleGeometry**). Následně funkce **createUI** dynamicky generuje příslušné **HTML prvky** pro uživatelské rozhraní, čímž zpřístupňuje úpravu grafických proměnných. Klíčovou částí je metoda **createRenderer**, která slouží jako **překladač** mezi uživatelskými vstupy a mapovým API. Využívá principu tzv. **data-driven stylování** prostřednictvím **grafických proměnných** (**visualVariables**). Zde je zvolený atribut automaticky navázán na barevnou škálu a extruzi polygonu, přičemž jsou využity dříve vypočítané statistiky (minimum a maximum). Architekturu metody uzavírá funkce **applyProperties**, jež definuje globální chování vrstvy, jako je její celková průhlednost či výška relativně k povrchu terénu.

```
const visualizationMethods = {
  ...
  prism: {
    title: "Prism Map",
    compatibleGeometry: ["polygon"],

    createUI: () => `
      ${commonColorUI}
      <h2>Transparency</h2><input type="range" id="transparencyInput" value="1"
        min="0" max="1" step="0.01">
      <h2>Extrusion</h2><label for="minZOffsetInput">Base Height (m):</label><input
        type="number" id="minZOffsetInput" value="0" step="1000"><br><label
        for="maxZOffsetInput">Extrusion (m):</label><input type="number"
        id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000">
      <h2>Height (Elevation)</h2><label for="heightAboveGroundInput">Height Above
        Ground (m):</label><input type="number" id="heightAboveGroundInput"
        value="0" step="1000">`,

    createRenderer: (uiValues) => ({
```

```

    type: "simple",
    symbol: {
      type: "polygon-3d",
      symbolLayers: [{ type: "extrude", material: { color: "white", colorMixMode:
        "replace" } } ],
      visualVariables: [
        { type: "color", field: uiValues.field, stops: uiValues.colorStops },
        { type: "size", field: uiValues.field, stops: [
          { value: uiValues.stats.min, size: uiValues.minZ },
          { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxZ } ] } ]
      }
    },
    applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity;
      layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height };
    }
  },
  ...
};

```

Algoritmus pro automatický výpočet výchozích hodnot (Smart Defaults)

Zásadním prvkem pro **optimalizaci uživatelského zážitku** (UX) a snížení kognitivní zátěže je implementace algoritmu pro tzv. **chytré výchozí hodnoty** (Smart Defaults). Algoritmus na vstupu přijímá **prostorový rozsah** načtené vrstvy (**extent**), z něhož vyhodnotí jeho šířku a výšku. Z těchto dvou hodnot je následně určena ta maximální (**scale**), která plní roli **hlavní referenční jednotky** pro konkrétní datovou sadu. Z této referenční hodnoty jsou následně odvozeny **optimální výchozí parametry** pro jednotlivé **3D grafické proměnné** (např. velikost znaku, výška extruze) pomocí jednoduchých **procentuálních koeficientů** (např. 0.05 představuje 5 % z celkového rozsahu). Algoritmus rovněž obsahuje logickou pojistku pro vizualizační metody, které ze své podstaty musí zůstat **ukotveny k povrchu terénu** (např. 3D kartogram, voxely). Pokud je detekována jedna z těchto metod (**groundedMethods**), je výškové odsazení od terénu (**calculatedHeight**) striktně přepsáno na **nulovou hodnotu**. Ve výsledku funkce vrací datový objekt obsahující kompletní sadu proporcionálně vypočítaných výchozích parametrů (výška, průměr, minimální a maximální extruze), které jsou následně aplikovány do uživatelského rozhraní a vykreslovacího enginu. Uživatel tak okamžitě po nahrání dat získává **vizuálně čitelný výstup** bez nutnosti prvotní manuální kalibrace.

```

function calculateSmartDefaults(extent, methodKey) {
  if (!extent) return null;

  const w = extent.width;
  const h = extent.height;
  const scale = Math.max(w, h);

  let calculatedHeight = Math.round(scale * 0.05);

  const groundedMethods = ["vertical", "3D_graduated_columns", "prism", "voxels"];
  if (groundedMethods.includes(methodKey)) {
    calculatedHeight = 0;
  }

  return {
    height: calculatedHeight,
    size: Math.round(scale * 0.025),
    minSize: Math.round(scale * 0.02),
    maxSize: Math.round(scale * 0.05),
  };
}

```

```

    minZ: Math.round(scale * 0.005),
    maxZ: Math.round(scale * 0.2),
    diameter: Math.round(scale * 0.02)
  };
}

```

Sdílení aktuálního stavu aplikace

Pro zajištění **reprodukovatelnosti** byla implementována funkce pro **sdílení aktuálního stavu aplikace pomocí URL adresy**. Funkce v prvním kroku dynamicky shromažďuje **všechny klíčové parametry** prostředí a zapouzdřuje je do komplexního datového objektu **state**. Tento objekt obsahuje informace o případném uživatelsky definovaném **modelu reliéfu (elevation)**, exaktní prostorové **souřadnice a úhly natočení virtuální kamery (camera)** a především **stav všech aktivních vrstev**. U každé vrstvy jsou extrahována nezbytná **metadata** pro její pozdější rekonstrukci, konkrétně **zdrojová URL adresa**, zvolená **metoda geovizualizace (methodKey)**, **stav viditelnosti** a kompletní **nastavení grafických proměnných (symbology)**. Následně je tento stavový objekt převeden do textového formátu **JSON**. Aby bylo zajištěno bezpečné přenášení těchto dat v rámci URL adresy bez narušení její struktury, je řetězec **ošetřen proti ztrátě speciálních znaků** (včetně podpory kódování UTF-8) a transformován do formátu **Base64** pomocí funkce **btoa()**. V závěrečné fázi je tento zakódovaný řetězec připojen jako parametr k aktuální webové adrese. K její aktualizaci je využito rozhraní HTML5 History API (**window.history.replaceState**), díky kterému se adresa v prohlížeči **plynule přepíše** bez nutnosti znovunačítání stránky. Uživatel tak okamžitě získává **trvalý odkaz** (tzv. permalink) odrážející **aktuální stav mapového okna**.

```

function updateShareUrl() {
  let currentElevationUrl = null;
  if (customElevationRadio.checked && map.ground.layers.length > 0) {
    currentElevationUrl = map.ground.layers.getItemAt(0).url;
  }

  const state = {
    layers: activeLayers.map(l => ({
      url: l.originalInputUrl || l.url,
      title: l.title,
      methodKey: l.methodKey,
      symbology: l.currentSymbology,
      visible: l.visible,
      isContext: !!l.isContextLayer
    })),
    camera: view.camera.toJSON(),
    elevation: currentElevationUrl
  };

  const encodedState = btoa(unescape(encodeURIComponent(JSON.stringify(state))));
  const newUrl = new URL(window.location);
  newUrl.searchParams.set('state', encodedState);
  window.history.replaceState({}, '', newUrl);
}

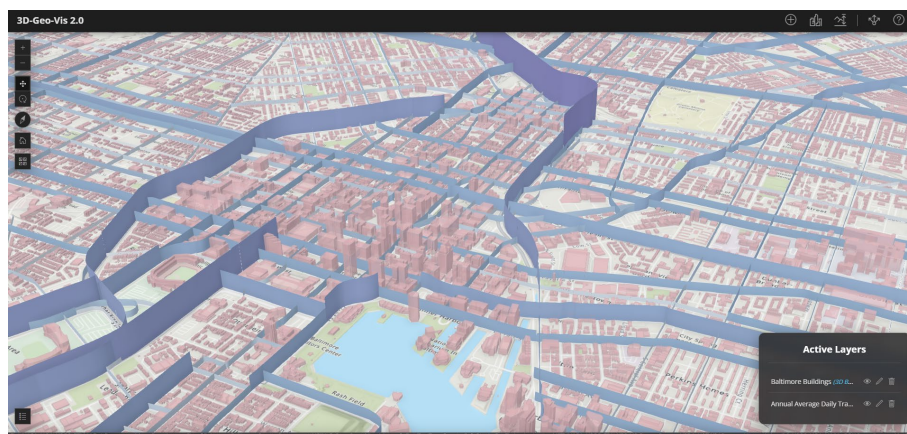
```

8.4 Příklady využití aplikace 3D-Geo-Vis 2.0

Pro demonstraci **praktické využitelnosti** a **analytického potenciálu** navrženého geovizualizačního prostředí 3D-Geo-Vis 2.0 jsou v této podkapitole představeny **konkrétní příklady** jeho uživatelského nasazení. **Vybrané scénáře** ilustrují široké možnosti aplikace napříč **různými měřítky** a **tematickými doménami**, přičemž ukazují především to, jak lze v interaktivním 3D prostoru kombinovat rozličná **data**, **metody** 3D geovizualizace a specifické **parametry** grafických proměnných k odhalování **prostorových souvislostí**.

Detailní měřítko

Příkladem **detailního (lokálního) měřítka** (obr. 67) je demonstrace využití 3D geovizualizačního prostředí pro analýzu v **hustě zastavěném urbánním prostoru** amerického města Baltimore¹. Scéna kombinuje fyzickou morfologii města s tematickými dopravními daty. Základní prostorový kontext tvoří vrstva **3D modelů budov**. Do této struktury je následně integrována metoda **vertikálních rovin** trasovaných podél uliční sítě, jež vizualizují hodnoty **průměrného ročního denního provozu** (AADT) ve státě Maryland za rok 2023. Pro jasné vyjádření **intenzity dopravní zátěže** je u těchto rovin využita synergie grafických proměnných *barva* a *extruze*. Tento přístup přináší zásadní analytickou hodnotu oproti tradičním 2D mapám, kde je objem dopravy **obvykle limitován pouze tloušťkou linií** a v husté zástavbě se stává nepřehledným. Vynesení dopravních dat do 3D prostoru ve formě různě vysokých barevných rovin umožňuje uživateli okamžitě identifikovat **hlavní dopravní tepny** a vizuálně korelovat objem dopravy s charakterem a výškou okolní zástavby. Plná interaktivita 3D prostředí navíc umožňuje scénu volně natáčet a nahlížet do ulic shora či pod úhlem, což efektivně eliminuje okluzi dopravních dat výškovými budovami ležícími v popředí.

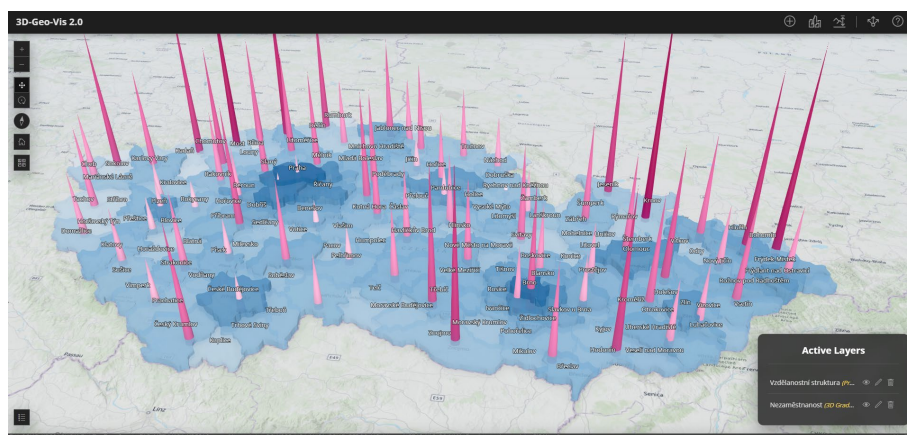


Obr. 67: Vizualizace intenzity dopravy (vertikální roviny) v kontextu městské zástavby

¹ <https://tinyurl.com/3D-Geo-Vis-local>

Regionální měřítko

Přechod do **regionálního měřítka** (obr. 68) je demonstrován na příkladu vizuální analýzy vybraných **socioekonomických ukazatelů** na úrovni **administrativních celků České republiky**². Základní vrstvu tvoří **3D kartogram**, který prostřednictvím grafických proměnných *barva* a *extruze* znázorňuje **podíl vysokoškolsky vzdělaného obyvatelstva** ve správních obvodech obcí s rozšířenou působností. Do této plošné reprezentace je následně integrována metoda sloupcových 3D kartodiagramů vizualizujících **míru nezaměstnanosti** v okresech. I v tomto případě jsou hlavními nositeli informací *barva* a *extruze*. Uživatel tak může velmi **rychle a intuitivně** identifikovat **regionální disparity** či **anomalie** – například oblasti s nízkou vzdělaností (nízká extruze polygonu, světlá modrá barva), které se potýkají s neúměrně vysokou nezaměstnaností (vysoká extruze sloupce, tmavá růžová barva).



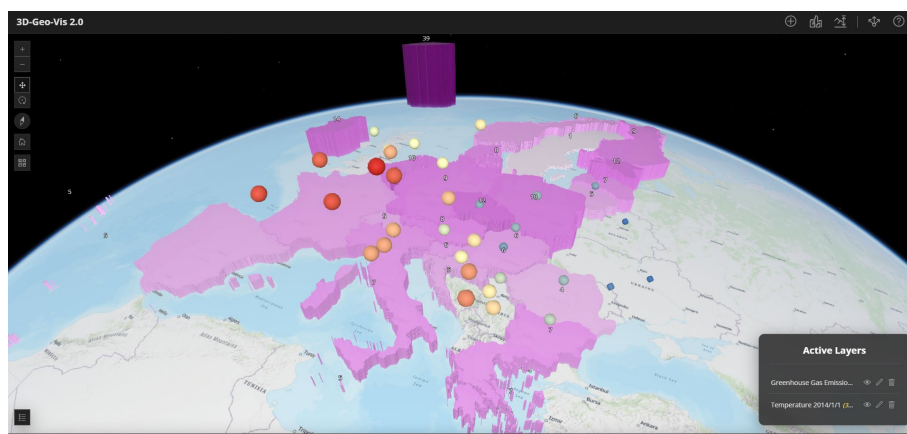
Obr. 68: Vizualizace podílu vysokoškolsky vzdělaného obyvatelstva (3D kartogram) a míry nezaměstnanosti (sloupcový 3D kartodiagram)

Kontinentální měřítko

Na příkladu **kontinentálního měřítka** (úroveň Evropy, obr. 69) je demonstrována schopnost aplikace synergicky propojovat **různé datové typy** (body, linie, plochy)³. Základní vrstvu scény tvoří **3D kartogram**, který prostřednictvím grafických proměnných *barva* a *extruze* vizualizuje **čisté emise skleníkových plynů** v tunách na obyvatele za jednotlivé evropské státy v roce 2021. Nad touto agregovanou plošnou vrstvou jsou vynesena data z předpovědního modelu **ALADIN** (teplota vzduchu o půlnoci 1. ledna 2014) ve formě **bodových 3D kartodiagramů**, kde proměnné *barva* a *velikost* indikuje **teplotní gradient**. Ačkoliv se jedná o ukázkovou vizualizaci dat z různých časových období, scéna jasně ilustruje analytický potenciál prostředí.

² <https://tinyurl.com/3D-Geo-Vis-regional>

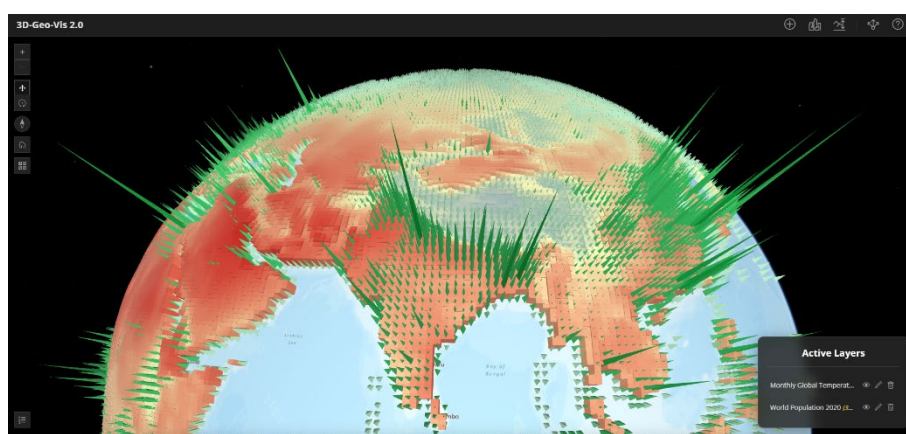
³ <https://tinyurl.com/3D-Geo-Vis-continental>



Obr. 69: Vizualizace emisí skleníkových plynů (3D kartogram) a teploty vzduchu (bodový 3D kartodiagram)

Globální měřítko

Posledním příkladem je využití v **globálním měřítku** (obr. 70). Vizualizace efektivně propojuje **spojitá klimatická data** s **diskrétními socioekonomickými ukazateli**⁴. První vrstvu tvoří metoda **voxelů**, jež reprezentuje **průměrnou měsíční teplotu pro měsíc červenec** (z referenčního období 1981–2010). Druhou vrstvou je metoda **sloupcových 3D kartodiagramů**, která znázorňuje **rozložení světové populace** v roce 2020. U obou metod hrají hlavní roli **barva** a **extruze**. Z hlediska vizuální analýzy nabízí tato kombinace unikátní pohled na prostorový **vztah mezi extrémními klimatickými podmínkami a hustotou lidského osídlení**. Uživatel může při interaktivní rotaci glóbu snadno identifikovat silně osídlené oblasti (vysoké tmavě zelené sloupce), které jsou zasaženy nejvyššími letními teplotami (vysoké tmavě červené voxely). Využití 3D prostoru navíc **přirozeně eliminuje plošné, délkové i úhlové zkreslení**, ke kterému by nevyhnutelně docházelo při plošném zobrazení pomocí klasických 2D kartografických zobrazení, a umožňuje uživateli vnímat prostorové vztahy v jejich **reálné sférické podstatě**.



Obr. 70: Vizualizace průměrné měsíční červencové teploty (voxely) a počtu obyvatel (sloupcový 3D kartodiagram)

⁴ <https://tinyurl.com/3D-Geo-Vis-global>

9 VÝSLEDKY

Předkládaná **disertační práce** si kladla za hlavní cíl vytvořit **komplexní teoretický a metodický koncept** pro **vizuální analýzu tematických prostorových dat ve 3D prostředí** a tento koncept následně uvést do praxe prostřednictvím vývoje **vlastní softwarové aplikace**. Tohoto hlavního cíle bylo úspěšně dosaženo. Výsledkem práce je **ucelené webové prostředí**, které propojuje hluboké teoretické **poznatky z oblasti moderní 3D kartografie** s plně funkčním **geovizualizačním prostředím 3D-Geo-Vis 2.0**. Podařilo se **systematizovat roztržštěné přístupy** k tvorbě 3D geovizualizací a prokázat, že cílená a interaktivní manipulace s **grafickými proměnnými** ve 3D prostoru přináší **signifikantní přidanou hodnotu** pro explorativní **vizuální analýzu**. K dosažení tohoto hlavního výstupu vedlo splnění **čtyř na sebe navazujících dílčích cílů**, jejichž konkrétní výsledky a výstupy jsou detailně popsány níže.

Výsledky dílčího cíle 1 – Horizontální roviny a výběr programu

Prvním dílčím výsledkem disertační práce je detailní **zhodnocení metody horizontálních rovin** jakožto výchozího přístupu pro 3D geovizualizaci tematických dat. Na modelových příkladech meteorologických dat **předpovědního modelu ALADIN** byla u této specifické metody otestována aplikovatelnost a limity vybraných **grafických proměnných**. Bylo definováno a analyzováno celkem 16 grafických proměnných, z nichž 12 vychází z tradičních 2D kartografických konceptů a 4 reflektují specifika 3D zobrazení. Výsledkem je vytvoření komplexní **hodnoticí matice** (resp. teoretického rámce), která pro každou z metod určuje **vhodnost, proveditelnost a potenciál** jednotlivých grafických proměnných. Tento krok posloužil jako nezbytný metodický základ a pilotní studie pro navazující systematické hodnocení dalších metod 3D geovizualizace. Druhým, avšak neméně důležitým výsledkem v rámci tohoto cíle, bylo **srovnání dostupných technologických platforem** pro tvorbu vlastního interaktivního 3D prostředí. Na základě exaktně definovaných požadavků na podporu prostorových dat, tvorbu 3D geovizualizací nebo analytické funkce byla provedena **selekce optimálního softwarového řešení**. Jako nejvhodnější technologie pro vývoj budoucí aplikace bylo vybráno prostředí **ArcGIS** (případně v kombinaci s dalšími technologiemi), čímž byl úspěšně položen základ pro praktickou (vývojovou) část disertační práce. Výsledky z prvního dílčího cíle byly prezentovány formou následujících výstupů:

- metodika hodnocení kartografické sémologie ve 3D,
- tabulky hodnocení grafických proměnných pro jednotlivé metody a celkového srovnání metod,
- hodnocení vybraných softwarů z hlediska vhodnosti pro vizuální analýzu ve 3D, včetně dvou srovnávacích tabulek.

První dílčí cíl – 3D geovizualizace meteorologických dat pomocí horizontálních rovin v prostředí různých programů – byl prezentován na Národní kartografické konferenci v Polsku formou posteru a publikován v článku *Evaluation of 3D geovisualization of volumetric geospatial data in the form of horizontal planes using selected software* v časopise *Geographia Cassoviensis* (Žejdlík a Voženílek, 2024).

Výsledky dílčího cíle 2 – Metody 3D geovizualizace tematických dat

Stěžejním teoretickým a metodologickým výsledkem disertační práce je rozšíření systematického zhodnocení horizontálních rovin o **šest dalších vybraných metod 3D geovizualizace** (mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny, 3D kartodiagram, 3D kartogram, voxely) v kontextu **aplikace grafických proměnných**. Vizualizace proběhly v prostředí programu ArcGIS Pro vybraném v předchozím dílčím cíli, přičemž byla opět vizualizována data modelu **ALADIN**. Společně s horizontálními rovinami tak byl definován a ukotven ucelený **soubor sedmi stěžejních přístupů** pro reprezentaci prostorových jevů ve třetím rozměru. Na základě výsledků **hodnocení sémiologických pravidel** byly popsány **optimální způsoby vizualizace 3D datových reprezentací** vhodné pro vizuální analýzu. Vedlejším praktickým výstupem v rámci tohoto dílčího cíle je **popis tvorby těchto 3D vizualizací v prostředí ArcGIS Pro**. Tyto zpracované postupy představují důležitý návod, který nejen prokazuje **technologickou proveditelnost** navržených geovizualizačních metod, ale tvoří i zcela nezbytný mezikrok pro následnou úspěšnou integraci a publikaci těchto dat ve finálním vizualizačním prostředí. Výsledky z druhého dílčího cíle byly prezentovány formou následujících výstupů:

- identifikace nejpoužívanějších metod tematické 3D geovizualizace,
- tabulky hodnocení grafických proměnných pro jednotlivé metody a celkového srovnání metod,
- postup tvorby tematických 3D geovizualizací z v ArcGIS Pro.

Druhý dílčí cíl – metody 3D geovizualizace v kontextu grafických proměnných – byl prezentován na 32. *Mezinárodní kartografické konferenci* (Vancouver, Kanada, 16.–22. srpna 2025) formou ústního příspěvku a publikován v článku *Methods of 3D Geovisualization of Thematic Data in the Context of Graphic Variables* v časopise *International Journal of Cartography* (Žejdlík a Voženílek, 2025).

Výsledky dílčího cíle 3 – Integrace s městskými a výškovými 3D modely

Třetím dílčím výsledkem práce je **integrace vytvořených tematických 3D geovizualizací s referenčními modely fyzického prostředí**. Ukázalo se, že samotná tematická data postrádají bez zasazení do reálného geografického kontextu plný analytický potenciál. Výsledkem tohoto cíle je proto **společná vizualizace heterogenních datových sad** v jednom 3D prostředí. K praktickému řešení a ověření tohoto cíle posloužily dvě odlišně koncipované **případové studie**. První případová studie byla realizována v **detailním (lokálním) měřítku** a zaměřila se na prostorovou integraci tematických dat s detailními **modely městské zástavby (3D budovami)**. Na příkladu vizualizace územního potenciálu pro bydlení byla demonstrována synergie analytických dat a reálné morfologie města. Nedílnou součástí tohoto řešení bylo provedení **strukturovaného dotazníkového šetření** (Příloha 1), jehož výsledkem bylo zhodnocení využitelnosti aplikovaných metod 3D geovizualizace a posouzení významnosti jednotlivých grafických proměnných z pohledu uživatelské percepce. Druhá případová studie byla aplikována v **kontinentálním měřítku**, kde stěžejní roli referenčního fyzického modelu plnil výškopis. Hlavním výsledkem této fáze byla tvorba **technologického prototypu webové aplikace** (Příloha 3) s využitím programového rozhraní **ArcGIS Maps SDK for JavaScript**. Na tomto prototypu následně proběhlo **testování použitelnosti** (Příloha 2). Výsledky tohoto testování umožnily včasnou identifikaci technologických limitů a nedostatků uživatelského rozhraní, což vedlo k **definování souboru**

potenciálních vylepšení. Poznatky získané z obou případových studií – jak z hlediska uživatelského vnímání grafických proměnných v detailním měřítku, tak z hlediska technologického fungování prototypu v kontinentálním měřítku – představovaly zcela **zásadní krok pro následný vývoj** finální verze geovizualizačního prostředí. Výsledky z třetího dílčího cíle byly prezentovány formou následujících výstupů:

- webová aplikace *Jihlava – 3D geovizualizace územního potenciálu*,
- vyhodnocení dotazníkového šetření aplikace *Jihlava – 3D geovizualizace územního potenciálu* ohledně využitelnosti jednotlivých metod a významnosti grafických proměnných,
- webová aplikace *3D-Geo-Vis*, včetně popisu zdrojového kódu,
- vyhodnocení testování použitelnosti aplikace *3D-Geo-Vis* a identifikace potenciálních limitů a vylepšení.

Část třetího dílčího cíle – integrace tematických a městských 3D dat pro vizuální analýzu – byla publikována v článku *Exploring Unconventional 3D Geovisualization Methods for Land Suitability Assessment: A Case Study of Jihlava City* v časopise *ISPRS International Journal of Geo-Information* (Bittner, Žejdlík et al., 2025).

Výsledky dílčího cíle 4 – Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D

Čtvrtým a zároveň finálním výsledkem disertační práce je samotný **návrh a vývoj interaktivního 3D geovizualizačního prostředí 3D-Geo-Vis 2.0** (Příloha 4). Tento výsledek představuje **syntézu** všech předchozích dílčích cílů – transformuje teoretické poznatky, hodnocené metody a principy vizuální analýzy do podoby plně **funkční webové aplikace**. Zásadním výstupem v rámci tohoto cíle je úspěšná **implementace definovaných grafických proměnných** do uživatelského rozhraní tak, aby bylo možné jejich parametry (např. barvu, extruzi, průhlednost či velikost) dynamicky a interaktivně měnit přímo nad vybranými 3D vrstvami. Tímto krokem byl naplněn **hlavní smysl práce**, a to posun **od pasivního prohlížení 3D scén k aktivní explorativní vizuální analýze trojrozměrných tematických dat**. Klíčovou funkcionalitou je možnost přidání vlastních tematických dat, výškopisných dat či 3D modelů budov, úprava grafických proměnných v reálném čase, volba metod a atributů pro vizualizaci, správa vrstev nebo sdílení. Potenciál využití aplikace je zároveň demonstrován prostřednictvím **série příkladů** pokrývajících **široké spektrum prostorových měřítek a tematických domén**. Výsledkem těchto demonstrací je jednoznačné prokázání **analytického potenciálu aplikace** – ať už se jedná o identifikaci meteorologických jevů z modelu ALADIN, korelaci socioekonomických ukazatelů, nebo analýzu městské dopravy. Praktické nasazení aplikace potvrdilo, že interaktivní 3D zobrazení může v některých ohledech **překonat limity tradiční 2D kartografie**, efektivně řeší problémy plošného zkrácení i vizuální okluze a přináší signifikantní přidanou hodnotu pro pochopení komplexních prostorových vztahů. Výsledky ze čtvrtého dílčího cíle byly prezentovány formou následujících výstupů:

- webová aplikace *3D-Geo-Vis 2.0*, včetně popisu vybraných částí zdrojového kódu,
- metodologie popisující metody 3D geovizualizace a grafické proměnné implementované v aplikaci *3D-Geo-Vis 2.0*,
- ukázky využití aplikace *3D-Geo-Vis 2.0* na praktických příkladech.

Čtvrtý dílčí cíl – geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D – bude společně s druhou případovou studií dílčího cíle 3 publikován v článku *3D-Geo-Vis: A Web-Based Environment for Interactive 3D Thematic Geovisualization and Its Usability Evaluation*. V současné době je článek v recenzním řízení. Zároveň bude dílčí cíl 4, resp. celá disertační práce prezentována formou ústního příspěvku *3D-Geo-Vis: A Geovisualization Tool for Visual Analysis of Thematic Data in 3D* na konferenci *EuroCARTO2026* (Brno, 9.–11. září 2026).

Hypotéza a výzkumné otázky

H: Aktivní a cílená manipulace s grafickými proměnnými v interaktivním 3D geovizualizačním prostředí umožňuje efektivní vizuální analýzu tematických dat a identifikaci prostorových vztahů a vzorů, jež jsou při použití tradičních metod 2D kartografie skryté nebo zkreslené.

Hypotéza byla **potvrzena**. Dosažené výsledky výzkumu prokázaly, že synergické **propojení 3D prostoru a grafických proměnných** (kap. 5.2 a 6.1) přináší **signifikantní analytickou přidanou hodnotu**. Na provedených případových studiích bylo doloženo, že interaktivní manipulace se 3D scénou v kombinaci s cílenou úpravou grafických proměnných efektivně **eliminuje vizuální překryv**. Platnost hypotézy z pohledu reálné uživatelské percepce byla validována prostřednictvím **dotazníkového šetření** (kap. 7.1) a **testování použitelnosti** prototypu aplikace (kap. 7.2.3). Zároveň bylo demonstrováno, že výsledky jsou **aplikovatelné napříč různými prostorovými měřítky** (kap. 8.4).

RQ1: Jaké grafické proměnné jsou při vizuální analýze ve 3D nejvýznamnější?

Na základě teoretického zhodnocení 16 grafických proměnných (kap. 5.2 a 6.1) a výsledků dotazníkového šetření (kap. 7.1) byly identifikovány čtyři nejvýznamnější proměnné pro 3D vizuální analýzu, a to **barva, velikost, extruze a průhlednost**.

RQ2: Jaké metody 3D geovizualizace jsou nejefektivnější pro vizuální analýzu tematických dat?

Výzkum prokázal, že **neexistuje jedna univerzálně nejefektivnější metoda**, nýbrž že efektivita vizuální analýzy je striktně podmíněna **povahou vstupních dat a účelem vizualizace**. Ze sedmi hodnocených metod se jako vysoce efektivní ukázaly horizontální roviny, 3D kartogramy a 3D kartodiagramy (kap. 7.1). Tyto poznatky by bylo vhodné v budoucnu prozkoumat podrobněji.

RQ3: Jakou funkcionalitu a nástroje musí obsahovat 3D geovizualizační prostředí, aby podporovalo efektivní vizuální analýzu 3D dat?

Aby prostředí přesáhlo úroveň pouhé 3D prohlížečky a umožnilo plnohodnotnou explorativní analýzu, musí splňovat **tři nezbytné technologické a funkční předpoklady** (kap. 7.2 a 8): **volná a plynulá navigace** (stěžejní pro překonání okluze a perspektivního zkreslení), **interaktivní manipulace s grafickými proměnnými** (možnost dynamicky měnit parametry zobrazení v reálném čase), **schopnost nahrávat a kombinovat vlastní tematická data** (ideálně v kombinaci s prvky terénu, jako jsou výškové modely nebo 3D budovy).

10 DISKUZE

V průběhu disertační práce docházelo k **mnoha klíčovým rozhodnutím** ohledně jejího dalšího směřování. Ať už se jednalo o výběr grafických proměnných pro hodnocení, volbu vhodného řešení pro tvorbu 3D geovizualizačního prostředí nebo optimalizaci finální verze aplikace s ohledem na uživatelské testování, vždy byl kladen důraz na **adekvátní obhajobu jednotlivých kroků**. Pro transparentní reflexi konkrétních metodických, technologických či uživatelských limitů práce byla vybrána **následující témata**:

Zohlednění dalších grafických proměnných

Při návrhu vizualizačního prostředí a hodnocení metod 3D geovizualizace bylo v rámci této práce definováno a využito celkem **16 grafických proměnných**, z nichž 12 vychází z tradičních 2D konceptů a 4 reflektují specifika 3D prostoru. Přestože tento soubor pokrývá zásadní aspekty tvorby 3D map a poskytuje robustní základ pro vizuální analýzu, do budoucna by bylo možné uvažovat o začlenění dalších, například **dynamických proměnných** (osvětlení, atmosférické efekty, mlha) nebo **pokročilejších fyzikálních vlastností materiálů** (povrch objektu, stínování, vyzařování světla).

Další metody 3D geovizualizace

Ačkoliv disertační práce detailně hodnotí a prakticky implementuje sedm vybraných metod 3D geovizualizace, **potenciál pro rozšíření** o další vizualizační techniky **je značný**. Z praktického hlediska se nabízí například podpora **3D linií** nebo **3D šipek**. Využití 3D linií by umožnilo efektivně analyzovat trajektorie objektů, letecké trasy, 3D inženýrské sítě nebo různé prostorové toky, u kterých hraje výšková členitost klíčovou roli. 3D šipky by následně našly široké uplatnění při vizualizaci směrových kartodiagramů (např. pro dopravu nebo migraci) nebo vektorových polí (např. pro zobrazení směru a rychlosti proudění větru). Kromě těchto přístupů by nástroj pro vizuální analýzu mohl obohatit i další specifické metody, jako jsou **izoplochy** (isosurfaces) pro spojitě mapování objemových dat (např. teplotní nebo tlakové vrstvy), nebo **space-time cubes**, které do 3D prostoru přirozeně integrují časovou dimenzi. Nezařazení těchto metod do aktuální verze aplikace bylo dáno primárně vymezeným rozsahem a cíli práce, zaměřením zejména na rastrová vstupní data a rovněž možnostmi využití webové platformy. Integrace těchto pokročilých metod tak představuje logický a perspektivní směr pro případný budoucí vývoj, neboť by signifikantně rozšířila spektrum jevů, které lze ve 3D prostředí analyzovat.

Alternativní řešení pro tvorbu aplikace

Volba technologické platformy pro vývoj prostředí 3D-Geo-Vis 2.0 představovala **stěžejní krok** s přímým dopadem na funkčnost, uživatelskou přívětivost i budoucí rozšiřitelnost aplikace. Ačkoliv bylo nakonec využito řešení na bázi ekosystému **Esri (ArcGIS Online)**, je namístě diskutovat i alternativní přístupy, které současný trh s technologiemi pro 3D geovizualizaci nabízí. Z pohledu webových frameworků představuje silnou alternativu **open-source knihovna Cesium** (CesiumJS). Její hlavní výhodou je vysoký výkon při renderování globálních dat, nativní podpora optimalizovaného formátu 3D Tiles a pokročilá práce s časovou složkou. To by se uplatnilo zejména při **vizualizaci dynamických jevů**. Vývoj komplexního uživatelského rozhraní pro interaktivní vizuální analýzu by zde však byl programátorsky i časově výrazně náročnější. Další zvažovanou možností bylo využití platform jako **Google Earth** či **Google Maps 3D API**. Tyto nástroje sice dominují v detailním zobrazení globálního kontextu a poskytují vynikající fotorealistický podklad, avšak pro potřeby úzce zaměřené tematické 3D geovizualizace a volné manipulace se specifickými grafickými proměnnými nabízejí **značně uzavřený ekosystém** a omezené možnosti plného

uživatelského přizpůsobení. Zcela odlišným, avšak v současné 3D kartografii silně rezonujícím přístupem, je využití **herních enginů**, jakými jsou **Unity** nebo **Unreal Engine**. Tyto platformy nabízejí bezkonkurenční **grafický výkon**, možnost práce s obrovskými objemy dat (včetně masivních mračen bodů a voxelových modelů), pokročilé nasvětlení a přímou integraci s technologiemi **virtuální a rozšířené reality** (VR/AR). Zásadní překážkou v jejich širším využití pro tvorbu podobných webových geovizualizačních aplikací je ovšem **složitější integrace standardních GIS formátů** a souřadnicových systémů, **strmější křivka učení** a **nutnost budovat elementární mapové a analytické nástroje zcela od základu**. Podobně jako u specializovaných webových knihoven typu **deck.gl** či **three.js** by vývoj v herním enginu přesáhl primární zaměření této práce, která se soustředí spíše na **kartografický a analytický koncept** než na samotný softwarový vývoj vlastního renderovacího jádra. Zvolené řešení tak představovalo optimální kompromis mezi dostupností analytických nástrojů a možnostmi vizualizace.

Limity a rozšiřitelnost výsledné aplikace

Samotná implementace geovizualizačního prostředí 3D-Geo-Vis 2.0 s sebou logicky přinesla i nutnost konfrontace s určitými **technologickými limity**, které primárně vycházejí ze zvolené architektury postavené na **ekosystému ArcGIS Online**. Zásadním omezením z hlediska správy dat a uživatelského vstupu je aktuální **závislost aplikace na sdílených webových vrstvách** prostřednictvím URL odkazů. Tento přístup prozatím **neumožňuje uživatelům importovat vlastní prostorová data** jiným, přímějším způsobem (např. lokálním nahráním souborů). Zvolená online distribuce dat má navíc přímý dopad na celkovou **výkonnost prostředí**. Obzvláště při zpracování prostorově rozsáhlých nebo na datový objem náročných 3D modelů dochází k prodávám a prodloužení doby načítání scény, což je **daň za webové řešení** bez nutnosti instalace desktopového softwaru.

Další rovina limitů se týká přímo **možností vizuální analýzy** a plného využití **grafických proměnných**. V rámci využitého programového rozhraní se ukázala jako velmi **obtížná až neproveditelná implementace** některých specifických proměnných (např. orientace, textura/vzor). Zároveň je v současné době vizualizace omezena na **jeden atribut pro jednu datovou vrstvu**, což znesnadňuje přímou víceatributovou vizualizaci. Příkladem je **3D kartogram**, u kterého není možné současně aplikovat **jeden atribut pro barvu a jiný atribut pro extruzi**. I přes výše zmíněná omezení však aplikace představuje robustní základ, který je **otevřený dalšímu rozšiřování**. Do budoucna se jako velmi perspektivní jeví především integrace podpory pro **časovou složku** a **animace**. Spolu se zapojením dalších pokročilých analytických nástrojů by takové rozšíření zásadně posunulo možnosti vizuální analýzy tematických dat ve 3D prostoru.

Kognitivní aspekty a limity vnímání ve 3D

Ačkoli geovizualizační prostředí 3D-Geo-Vis 2.0 poskytuje **širokou škálu nástrojů pro vizuální analýzu** prostřednictvím sedmi metod a mnoha grafických proměnných, je nezbytné kriticky reflektovat také **kognitivní limity** spojené se samotným **vnímáním 3D prostoru**. Ve srovnání s tradiční 2D kartografií přináší 3D zobrazení **specifické výzvy**, které mohou proces vizuální analýzy znesnadňovat. Zásadním problémem je především **okluze** (zakrývání), kdy objekty nacházející se v popředí scény – typicky u hustých mračen bodů, 3D kartodiagramů nebo voxelů – nevyhnutelně **skrývají data ležící za nimi**. Dalším významným faktorem je **perspektivní zkreslení**, které komplikuje přesné odčítání a vzájemné porovnávání absolutních hodnot (například výšky vertikálních rovin či velikosti 3D znaků) v závislosti na jejich aktuální vzdálenosti od pozorovatele. Tyto percepční bariéry mohou vést k **chybné interpretaci** prostorových vztahů či distribučních vzorců, zejména při analýze komplexních a objemných datových

sad. Aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 se tyto limity snaží do značné míry **kompenzovat důrazem na plnou interaktivitu prostředí**. Možnost volné navigace ve scéně, plynulé rotace, změny měřítka či **cílená manipulace s průhledností objektů** představují klíčové mechanismy, které uživateli umožňují tyto kognitivní překážky překonávat a nahlížet na data z optimálních úhlů. Přesto zůstává celková míra kognitivní zátěže uživatele při práci ve 3D důležitým faktorem.

Uživatelské testování výsledné aplikace

Nedílnou součástí vývoje většiny mapových a softwarových aplikací bývá v ideálním případě **komplexní uživatelské testování**. V rámci předložené práce však bylo od testování výsledné aplikace nakonec upuštěno, a to hned z několika objektivních důvodů. Prvním faktorem byla **značná časová dotace** vyžadovaná pro samotný teoretický návrh, technologickou implementaci a následné ladění aplikace, která nezanechala dostatečný prostor pro rigorózní provedení a vyhodnocení testů. Zásadnější překážku však představovala samotná **metodická složitost návrhu validního testovacího scénáře**, u něhož vyvstalo specifické dilema týkající se **způsobu práce se vstupními daty**. Na jedné straně se nabízelo využití testovacího prostředí s **pevně předpřipravenými datovými sadami**. Tento přístup by sice výrazně usnadnil a zrychlil průběh testování, nicméně by zcela eliminoval možnost otestovat jednu z klíčových fází interakce – samotné **vyhledávání a přidávání datových vrstev uživatelem**. Na straně druhé, pokud by testovací scénář vyžadoval, aby si participant sami vyhledávali a nahrávali vrstvy (vzhledem k výše zmíněným limitům například prostřednictvím URL odkazů či přímým vyhledáváním v repositáři ArcGIS Online), neúměrně by to **zvýšilo časovou náročnost testu**. Tento krok není v současné verzi aplikace natolik uživatelsky přívětivý a intuitivní, aby tvořil plynulý začátek testovací relace. Mohlo by tak snadno dojít k **počáteční frustraci respondentů**, což by nevyhnutelně zkreslilo výsledky hodnocení samotné vizuální analýzy ve 3D. Plnohodnotný návrh a realizace uživatelského testování, které by tyto proměnné vhodně izolovalo, se tak nabízí jako potenciál do budoucna. Uživatelské testování bylo alespoň částečně vyřešeno **modulem pro kontinuální sběr zpětné vazby** ve formě tlačítka na horní liště. Tento mechanismus umožňuje sbírat **poznatky z reálného nasazení nástroje**, což vytvoří robustní podklady pro budoucí iterace a rozvoj aplikace.

Využití umělé inteligence

V souladu s **aktuálními trendy** v oblasti softwarového vývoje i akademické praxe byly v průběhu zpracování této disertační práce využity nástroje **generativní umělé inteligence**, a to striktně v roli podpůrných a konzultačních prostředků. Při samotném vývoji a programování 3D geovizualizačního prostředí posloužily velké jazykové modely – konkrétně **ChatGPT** (v bezplatné verzi) a **Google Gemini** (zpočátku ve verzi Free, posléze ve verzi Pro) – jako asistenční nástroje pro optimalizaci dílčích částí zdrojového kódu, vyhledávání řešení specifických programátorských problémů a ladění chyb. Vedle technického vývoje aplikace byla umělá inteligence okrajově zapojena i do procesu tvorby samotného textu práce. Zde figurovala jako nástroj pro **brainstorming a strukturování myšlenek**, a následně pro dílčí **stylistické a jazykové úpravy**, které přispěly k lepší čitelnosti a plynulosti odborného textu. Je však nezbytné zdůraznit, že **veškeré stěžejní části**, jako je specifikace a hodnocení metod, návrh případových studií, koncepce 3D geovizualizačního prostředí nebo interpretace výsledků, jsou **výlučně autorským dílem**. Umělá inteligence nijak nezasahovala do odborné podstaty výzkumu; její přínos spočíval výhradně ve **zefektivnění rutinních a formálních úkonů**, přičemž **plnou odpovědnost** za finální podobu a obsah práce **nese její autor**.

11 ZÁVĚR

Předkládaná **disertační práce** se komplexně věnovala **problematicke 3D geovizualizace tematických dat** a procesu **vizuální analýzy** ve třetím rozměru. Hlavním cílem práce bylo vytvořit **teoretický a metodický koncept**, který by posunul vnímání 3D map z pozice pouhých statických či pasivních prohlížeček do role plnohodnotných **interaktivních analytických nástrojů**. Tohoto cíle bylo úspěšně dosaženo prostřednictvím logické posloupnosti výzkumných kroků, jež vyústily ve vývoj **vlastního softwarového řešení**.

Výzkum byl v počáteční fázi ukotven rozsáhlou **bibliografickou analýzou** a **literární rešerší**, které pomohly identifikovat **aktuální trendy**, **terminologickou nejednotnost** a definovat **existující mezery** v oblasti 3D kartografie a vizuální analýzy. Na tento teoretický základ bezprostředně navázala tvorba ucelené **metodiky hodnocení grafických proměnných**. Aby bylo možné koncept prakticky uchopit, byla metodika nejprve pilotně otestována na metodě **horizontálních rovin**, což šlo ruku v ruce s kritickým zhodnocením dostupných technologických platforem a následným **výběrem optimálního softwarového řešení** pro budoucí vývoj. S nabytými technologickými a metodickými znalostmi byl výzkum následně rozšířen na celkem **sedm stěžejních metod 3D geovizualizace** (horizontální roviny, mračno bodů, 3D povrch, vertikální roviny, 3D kartodiagram, 3D kartogram a voxely). Pro každou z těchto metod byl v rámci práce popsán **postup tvorby**.

Zásadním krokem pro ověření navržených konceptů byla jejich **aplikace v praxi** a **interakce s koncovými uživateli**. V **detailním (lokálním) měřítku** byla zpracována případová studie pro **město Jihlava**, zaměřená na 3D geovizualizaci územního potenciálu pro bydlení. Zahrnutí reálných městských 3D modelů umožnilo demonstrovat **nezbytnost fyzického kontextu** pro tematická data. Tato případová studie byla navíc podrobena **uživatelskému testování**, jehož výsledky poskytly cennou zpětnou vazbu ohledně lidské **percepce 3D prostoru** a srozumitelnosti jednotlivých vizualizací. Paralelně s teoretickým výzkumem a případovými studiemi probíhal **vývoj samotného geovizualizačního prostředí**. Prvním milníkem bylo vytvoření **prototypové webové aplikace 3D-Geo-Vis⁵**. Na tomto prototypu bylo provedeno cílené **testování použitelnosti**, které pomohlo identifikovat technologické limity a překážky v uživatelském rozhraní.

Poznatky získané z teoretických hodnocení, uživatelského testování na datech Jihlavy a testování použitelnosti prototypu se staly primárním vstupem pro **závěrečnou syntézu celé disertační práce – vývoj finální aplikace 3D-Geo-Vis 2.0⁶**. Hlavní přidaná hodnota geovizualizačního prostředí 3D-Geo-Vis 2.0 spočívá v unikátním **propojení teoretických kartografických konceptů s praktickou interaktivní vizuální analýzou ve webovém 3D prostoru**. Na rozdíl od mnoha existujících 3D prohlížeček, které často slouží pouze k prosté a statické prezentaci prostorových dat, byla tato aplikace od počátku koncipována jako komplexní analytický nástroj. Zásadním vědeckým a metodologickým přínosem je **systematická**

⁵ aplikace: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis/horizontal.html
zdrojové kódy: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis

⁶ aplikace: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2
zdrojové kódy: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2

implementace a zhodnocení sedmi specifických metod 3D geovizualizace napříč uceleným souborem šestnácti grafických proměnných. Tento přístup uživatelům poskytuje výjimečnou flexibilitu a umožňuje jim cílenou manipulaci s vizuálním zobrazením zkoumat skryté prostorové vztahy a vzorce v tematických datech. Možnost interaktivně pracovat s metodami jako jsou voxely, 3D povrchy či vertikální roviny přímo ve webovém prohlížeči zásadně usnadňuje interpretaci vertikální i horizontální struktury jevů. Významnou předností je rovněž samotná **webová povaha aplikace** – využití dostupných cloudových technologií demokratizuje přístup k pokročilé 3D geovizualizaci, neboť eliminuje nutnost instalace nákladného a hardwarově náročného desktopového GIS softwaru.

Aplikace **3D-Geo-Vis 2.0** tak představuje nejen **funkční technologické řešení**, ale i ověřený **metodický rámec** posouvající možnosti současné tematické 3D kartografie. Disertační práce tak ve svém celku jednoznačně prokázala, že **aktivní a cílená manipulace** s parametry **grafických proměnných** v **interaktivním 3D prostředí** zásadním způsobem **zefektivňuje explorativní vizuální analýzu**.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- ALASTAL, Abdelkhalek; Raed SALHA a M. EL-HALLAQ, 2019. The Reality of Gaza Strip Cities towards the Smart City's Concept. A Case Study: Khan Younis City. *Current Urban Studies*. Online. 07, 143–155. Dostupné z: doi:10.4236/cus.2019.71006
- ALL3DP, 2022. The Top 10 3D File Formats of 2022. *All3DP*. Online [vid. 2023-05-31]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/most-common-3d-file-formats-model/>
- ALL3DP, 2023. Top 10: The Best 3D Modeling Software. *All3DP*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-modeling-software-3d-cad-3d-design-software/>
- AN, Seung Man; Ho-Young LEE; Byungsoo KIM; Chae-Yeon Yi; Jeong-Hee EUM a Jung-Hun WOO, 2014. Geospatial spreadsheets with microscale air quality visualization and synchronization for supporting multiple-scenario visual collaboration. *International Journal of Geographical Information Science*. Online. 28(12), 2511–2532. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658816.2014.938077
- ANDRIENKO, Gennady; P. ANDRIENKO; Piotr JANKOWSKI; Daniel KEIM; Menno-Jan KRAAK; Alan MACEACHREN a S. WROBEL, 2007. Geovisual analytics for spatial decision support: Setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*. Online. 21, 839–587. Dostupné z: doi:10.1080/13658810701349011
- ANDRIENKO, N.; G. ANDRIENKO; A. SAVINOV; H. VOSS a D. WETTSCHERECK, 2001. Exploratory Analysis of Spatial Data Using Interactive Maps and Data Mining. *Cartography and Geographic Information Science*. Online. 28(3), 151–166. ISSN 1523-0406. Dostupné z: doi:10.1559/152304001782153035
- APEH, M. M. a A. ABDUL RAHMAN, 2023. A REVIEW OF 3D SPATIAL DATA MODELS FOR SURFACE AND SUBSURFACE INTEGRATION OF SPATIAL OBJECTS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. XLVIII-4-W6-2022, 15–23. ISSN 1682-1750. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-2022-15-2023
- ARCDATA PRAHA, 2023. ArcGIS Earth. *ARCDATA PRAHA*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/cs-cz/produkty/arcgis/arcgis-earth/uvod>
- ARCHAEOLOGY DATA SERVICE, 2023. *Sources and types of 3D data – Archaeology Data Service*. Online. [vid. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://archaeologydataservice.ac.uk/help-guidance/guides-to-good-practice/data-analysis-and-visualisation/3d-models/creating-3d-data/sources-and-types-of-3d-data/>
- ARROYO OHORI, Ken; Hugo LEDOUX a Jantien STOTER, 2015. An evaluation and classification of nD topological data structures for the representation of objects in a higher-dimensional GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. Online. 29(5), 825–849. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658816.2014.999683
- ATLAS, 2024. 3D Model - Definitions & FAQs | Atlas. *Atlas | Where maps come to life*. Online [vid. 2024-10-31]. Dostupné z: <https://atlas.co/glossary/3-d-model/>
- AUTODESK, INC., 2025. *Autodesk Revit*. Online [vid. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/cz/products/revit/overview>
- AXIS MAPS, 2023. Visual Variables. *Cartography Guide - A short, friendly guide to basic principles of map design*. Online [vid. 2023-10-18]. Dostupné z: <https://www.axismaps.com//guide/visual-variables>
- AZRI, Suhaibah; Francois ANTON; Uznir UJANG; Darka MIOC a Alias A. RAHMAN, 2015. Crisp Clustering Algorithm for 3D Geospatial Vector Data Quantization. In: M. BREUNIG; M. ALDOORI; E. BUTWILOWSKI; P. V. KUPER; J. BENNER a K. H. HAEFELE, ed. *3d Geoinformation Science, 3d Geoinfo 2014*. Online. Berlin: Springer-Verlag Berlin, s. 71–85 [vid. 2023-05-18]. ISBN 978-3-319-12181-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-12181-9_5
- BANDROVA, Temenoujka, 2005. Innovative technology for the creation of 3D maps. *Data Science Journal*. Online. 4, 53–58. Dostupné z: doi:10.2481/dsj.4.53
- BANDROVA, Temenoujka, 2016. *DESIGNING OF SYMBOL SYSTEM FOR 3D CITY MAPS*. Online. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.1474.1523

- BANDROVA, Temenoujka, 2022. Real Environment 3D Model – a Base for 3D Map Making. *Kartografija i geoinformacije*. Online. 21 (izv. / spec.), 13–23. ISSN 1333-896X, 1848-0713. Dostupné z: doi:10.32909/kg.21.si.2
- BATTY, Michael; Martin DODGE; Simon DOYLE a Andrew HUDSON-SMITH, 1998. Modelling virtual urban environments. *Batty, Michael and Dodge, Martin and Doyle, Simon and Smith, Andy (1998) Modelling virtual urban environments. Working paper. CASA Working Papers (1). Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK*.
- BERAN, Daniel; Karel JEDLIČKA; Kavisha KUMAR; Stanislav POPELKA a Jantien STOTER, 2022. The Third Dimension in Noise Visualization – a Design of New Methods for Continuous Phenomenon Visualization. *The Cartographic Journal*. Online. 59(1), 1–17. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1080/00087041.2021.1889450
- BERTIN, Jacques, 1967. *Sémiologie graphique: Les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris: Gauthier-Villars.
- BILJECKI, Filip, 2017. *Level of detail in 3D city models*. Online. No publisher. Dissertation. TU Delft. Dostupné z: doi:10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248
- BILJECKI, Filip; Hugo LEDOUX a Jantien STOTER, 2017. Generating 3D city models without elevation data. *Computers Environment and Urban Systems*. Online. 64, 1–18. Dostupné z: doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001
- BITTNER, Oldrich a Jaroslav BURIAN, 2024. Modelling future urban scenarios of land suitability: a case study of Jihlava city. *International Journal of Digital Earth*. Online. 17(1), 2433613. ISSN 1753-8947. Dostupné z: doi:10.1080/17538947.2024.2433613
- BITTNER, Oldrich; Jakub ZEJDLIK; Jaroslav BURIAN a Vit VOZENILEK, 2025. Exploring Unconventional 3D Geovisualization Methods for Land Suitability Assessment: A Case Study of Jihlava City. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Online. 14(7), 269. ISSN 2220-9964. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi14070269
- BITTNER, Oldřich, 2022. *Aplikace metody geodesignu v prostředí ArcGIS GeoPlanner*. Online. No publisher [vid. 2023-06-07]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: https://theses.cz/id/ivkxko
- BLEISCH, S., 2012. 3D GEOVISUALIZATION – DEFINITION AND STRUCTURES FOR THE ASSESSMENT OF USEFULNESS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. I–2, 129–134. ISSN 2194-9042. Dostupné z: doi:10.5194/isprsannals-I-2-129-2012
- BLEISCH, Susanne, 2011. Toward Appropriate Representations of Quantitative Data in Virtual Environments. *Cartographica*. Online. 46, 252–261. Dostupné z: doi:10.3138/carto.46.4.252
- BRUS, Jan, 2013. *Vizualizace nejistoty v environmentálních studiích*. Online. No publisher [vid. 2024-10-15]. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: https://theses.cz/id/34uobh
- BUCHROITHNER, Manfred a Claudia KNUST, 2013. True-3D in Cartography - Current Hard- and Softcopy Developments. *Moore, A. and Drecki, I. (Hrsg.): Geospatial Visualisation, Springer Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (LNG&C)*. Online. 41–65. ISSN 9783642122880. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12289-7_3
- BURIAN, Jaroslav; Marketa STACHOVA a Alena VONDRAKOVA, 2018. Land suitability assessment of the Olomouc region: an application of an Urban Planner model. *Journal of Maps*. Online. 14, 73–80. Dostupné z: doi:10.1080/17445647.2018.1493407
- BURIAN, Jaroslav; Stanislav STASTNY; Jan BRUS; Vilém PECHANEC a Vít VOŽENÍLEK, 2015. Urban planner: Model for optimal land use scenario modelling. *Geografie*. Online. 120, 330–353. Dostupné z: doi:10.37040/geografie2015120030330
- BUYUKSALIH, I.; S. BAYBURT; G. BUYUKSALIH; A. P. BASKARACA; H. KARIM a A. A. RAHMAN, 2017. 3D MODELLING AND VISUALIZATION BASED ON THE UNITY GAME ENGINE – ADVANTAGES AND CHALLENGES. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. IV-4-W4, 161–166. ISSN 2194-9042. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-161-2017
- CAJTHAML, Jiri; Darina KRATOCHVÍLOVÁ a Tomáš JANATA, 2019. 3D Model of Historical Vltava River Valley: Combination of Sources. *Proceedings of the ICA*. Online. 2, 1–5. Dostupné z: doi:10.5194/ica-proc-2-14-2019
- CAJTHAML, Jiri a Pavel TOBIÁŠ, 2016. 3D PROCEDURAL RECONSTRUCTION OF URBAN LANDSCAPES FOR THE PURPOSES OF A WEB-BASED HISTORICAL ATLAS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote*

- Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. XLII-2/W2, 41–43. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W2-41-2016
- CALDEIRA, Carlos; Mhamad EL HAGE; Mayara CALDEIRA; Eric GORGENS; Jean OMETTO a Laurent POLIDORI, 2023. Comparison between Digital Terrain Models generated by P-Band Radar and LiDAR in the Amazon, a case study in Amapá (Brazil). *Revista de Geociências do Nordeste*. Online. 9, 59–69. Dostupné z: doi:10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31574
- CDSE, 2025. *Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model | Copernicus Data Space Ecosystem*. Online [vid. 2026-01-19]. Dostupné z: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM>
- CESIUM GS, 2023a. Cesium ion pricing plans. *Cesium*. Online [vid. 2023-10-13]. Dostupné z: <https://cesium.com/platform/cesium-ion/pricing/>
- CESIUM GS, 2023b. The Cesium Platform. *Cesium*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://cesium.com/platform/>
- CESIUM GS, 2026. Cesium for Unreal. *Cesium*. Online [vid. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://cesium.com/platform/cesium-for-unreal/>
- CLEVELAND, William S. a Robert MCGILL, 1984. Graphical Perception: Theory, Experimentation, and Application to the Development of Graphical Methods. *Journal of the American Statistical Association*. Online. 79(387), 531–554. ISSN 0162-1459. Dostupné z: doi:10.1080/01621459.1984.10478080
- ÇÖLTEKIN, Arzu; Susanne BLEISCH; Gennady ANDRIENKO a Jason DYKES, 2017. Persistent challenges in geovisualization – a community perspective. *International Journal of Cartography*. Online. 3(sup1), 115–139. ISSN 2372-9333. Dostupné z: doi:10.1080/23729333.2017.1302910
- ÇÖLTEKIN, Arzu; Halldór JANETZKO a Sara FABRIKANT, 2018. Geovisualization. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. Online. 2018(Q2) [vid. 2023-05-29]. ISSN 25772848. Dostupné z: doi:10.22224/gistbok/2018.2.6
- ÇÖLTEKIN, Arzu; Ismini LOKKA a M. ZAHNER, 2016. ON THE USABILITY AND USEFULNESS OF 3D (GEO)VISUALIZATIONS – A FOCUS ON VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. XLI-B2, 387–392. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-387-2016
- CORBETT, Jon a Kevin WADE, 2005. Player Perspective: Using Computer Game Engines for 3D Cartography. *Cartographica*. Online. 40, 113–120. Dostupné z: doi:10.3138/8443-505Q-M8T1-1774
- ČERBA, Otakar, 2009. Google Earth a tematické mapy. *Kartografické listy*. 17. ISSN 1336-5274.
- ČÚZK, 2020a. 3D mapování. *Slovník TK ČÚZK*. Online [vid. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=7520&l=3d-mapovani>
- ČÚZK, 2020b. 3D model. *Slovník TK ČÚZK*. Online [vid. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=7521&l=3d-model>
- ČÚZK, 2020c. 3D modelování. *Slovník TK ČÚZK*. Online [vid. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=7522&l=3d-modelovani>
- ČÚZK, 2023a. Registr územní identifikace, adres a nemovitostí (RÚIAN). *Státní správa zeměměřičtví a katastru*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/ruian/>
- ČÚZK, 2023b. ZABAGED® - Výškopis - DMP 1G. Digitální model povrchu České republiky 1. generace v S-JTSK, Bpv. *Geoportál ČÚZK*. Online [vid. 2023-07-24]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(miq3j0lcttzo2sgxntuokeix\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopi&s&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303](https://geoportal.cuzk.cz/(S(miq3j0lcttzo2sgxntuokeix))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopi&s&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303)
- ČÚZK, 2023c. ZABAGED® - Výškopis - DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace. *Geoportál ČÚZK*. Online [vid. 2023-06-02]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(regzwrh5n0w0pulqpjaor0q\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(regzwrh5n0w0pulqpjaor0q))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)

- ČÚZK, 2025. ZABAGED® - Výškopis - Digitální model povrchu České republiky z obrazové korelace v S-JTSK, Bpv. *Geoportál ČÚZK*. Online [vid. 2026-01-19]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.gov.cz/\(S\(xlbhnbhzmshgqpsgjzzshdd3\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMPOK&mapid=8&menu=3032](https://geoportal.cuzk.gov.cz/(S(xlbhnbhzmshgqpsgjzzshdd3))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMPOK&mapid=8&menu=3032)
- DĚDKOVÁ, Pavla, 2012. *3D vizualizace zaniklé obce a její hodnocení z hlediska uživatelské kognice*. Online. No publisher [vid. 2023-06-05]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/rx3oz4/>
- DELIGANT, Anatole Matthias, 2022. *Digital twins in the context of disaster preparedness: fusion of GIS and game engines*. Online. No publisher [vid. 2025-04-03]. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/ywzda6/>
- DEVAUX, Alexandre; Charlotte HOARAU; Mathieu BRÉDIF a Sidonie CHRISTOPHE, 2018. 3D URBAN GEOVISUALIZATION: IN SITU AUGMENTED AND MIXED REALITY EXPERIMENTS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. IV–4, 41–48. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-41-2018
- DÜBEL, Steve a H. SCHUMANN, 2017. Visualization of Features in 3D Terrain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Online. 6, 357. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi6110357
- EEA, 2023. European Digital Elevation Model (EU-DEM). *European Environment Agency*. Online [vid. 2023-07-24]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/d08852bc-7b5f-4835-a776-08362e2fbf4b>
- EPIC GAMES, 2023. Unreal Engine | The most powerful real-time 3D creation tool. *Unreal Engine*. Online [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US>
- EPIC GAMES, 2026. Large World Coordinates in Unreal Engine 5 | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community. *Epic Games Developer*. Online [vid. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/large-world-coordinates-in-unreal-engine-5>
- ESRI, 2021. *Fundamentals of 3D data—ArcMap | Documentation*. Online [vid. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-data.htm>
- ESRI, 2023a. ArcGIS Maps SDK for Unity | ArcGIS Developers. *ArcGIS Maps SDK for Unity*. Online [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://developers.arcgis.com/unity/>
- ESRI, 2023b. ArcGIS Maps SDK for Unreal Engine | ArcGIS Developers. *ArcGIS Maps SDK for Unreal Engine*. Online [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://developers.arcgis.com/unreal-engine/>
- ESRI, 2023c. *ArcGIS Pro*. Online [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- ESRI, 2023d. OpenStreetMap 3D Buildings - Přehled. *ArcGIS Online*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=ca0470dbb4db28bad74ed39949e25>
- ESRI, 2023e. Swipe right for a powerful storytelling tool. *ArcGIS Blog*. Online. [vid. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-storymaps/constituent-engagement/swipe-right-for-powerful-storytelling/>
- ESRI, 2023f. What can you add to ArcGIS Online? *ArcGIS Online Help | Documentation*. Online [vid. 2023-10-12]. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/reference/supported-items.htm>
- ESRI, 2024. *Multidimensional raster data—ArcGIS Pro | Documentation*. Online [vid. 2024-09-16]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/an-overview-of-multidimensional-raster-data.htm>
- ESRI, 2025. ArcGIS Maps SDK for JavaScript. *ArcGIS Maps SDK for JavaScript 4.33*. Online [vid. 2025-09-16]. Dostupné z: <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/>
- ESRI, 2026. *3D Visualization & Simulation | Real-Time 3D | ArcGIS Maps SDKs for Game Engines*. Online [vid. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/develop-with-arcgis/features/arcgis-maps-sdks-for-game-engines>

- FAKULTA INFORMATIKY MU, 2024. *Theses.cz – Vysokoškolské kvalifikační práce*. Online [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/>
- FALTEJSKOVÁ, Martina, 2019. *Vliv třetího rozměru na využití kartografické vizualizace*. Online. No publisher [vid. 2023-06-05]. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/69sgm9>
- FIELD, Kenneth, 2018. *Cartography*. 1st vyd. No publisher: Esri Press. ISBN 978-1-58948-439-9.
- FREITAG, Ulrich, 1971. Semiotik und Kartographie. Über die Anwendung kybernetischer Disziplinen in der theoretischen Kartographie. *Kartographische Nachrichten*. 21.
- FUTURE PLC, 2022. The best 3D modelling software in June 2023. *Creative Bloq*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.creativebloq.com/features/best-3d-modelling-software>
- GARLANDINI, Simone a Sara Irina FABRIKANT, 2009. Evaluating the Effectiveness and Efficiency of Visual Variables for Geographic Information Visualization. In: Kathleen Stewart HORNSBY; Christophe CLARAMUNT; Michel DENIS a Gérard LIGOZAT, ed. *Spatial Information Theory*. Online. Berlin, Heidelberg: Springer, s. 195–211. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-03832-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-03832-7_12
- GAUTIER, Jacques; Mathieu BRÉDIF a Sidonie CHRISTOPHE, 2020a. *Co-Visualization of Air Temperature and Urban Data for Visual Exploration*. Online. Dostupné z: doi:10.1109/VIS47514.2020.00021
- GAUTIER, Jacques; Sidonie CHRISTOPHE a M BRÉDIF, 2020b. Visualizing 3D climate data in urban 3D models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. XLIII-B4-2020. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-781-2020
- GEMEENTE AMSTERDAM, 2023. *3D Amsterdam*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://3d.amsterdam.nl/>
- GERMAK, Oksana; Oksana GUGUEVA a Natalya KALACHEVA, 2021. Creation of digital terrain models using software applications. *E3S Web of Conferences*. Online. 281, 05008. ISSN 2267-1242. Dostupné z: doi:10.1051/e3sconf/202128105008
- GOOGLE, 2023. *Google Earth*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://earth.google.com/web/>
- GOVERNMENT OF CANADA, 2023. What is GRIB. *Environment Canada*. Online [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: https://weather.gc.ca/grib/what_is_GRIB_e.html
- GRÖGER, Gerhard a Lutz PLÜMER, 2012. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Online. 71, 12–33. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004
- HÄBERLING, Ch., 2002. 3D Map Presentation – A Systematic Evaluation of Important Graphic Aspects. In: *Proceedings of ICA Mountain Cartography Workshop 'Mount Hood'*.
- HÄBERLING, Christian; Hansruedi BÄR a Lorenz HURNI, 2008. Proposed Cartographic Design Principles for 3D Maps: A Contribution to an Extended Cartographic Theory. *Cartographica*. Online. 43, 175–188. Dostupné z: doi:10.3138/carto.43.3.175
- HÁJEK, Pavel, 2018. *Virtuální 3D mapy z pohledu kartografie*. Online. No publisher [vid. 2024-09-18]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Dostupné z: <https://theses.cz/id/p8rgvg>
- HÁJEK, Pavel; Karel JEDLIČKA a Václav ČADA, 2016. PRINCIPLES OF CARTOGRAPHIC DESIGN FOR 3D MAPS- FOCUSED ON URBAN AREAS. In: *6 th International Conference on Cartography and GIS*. Online. [vid. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/PRINCIPLES-OF-CARTOGRAPHIC-DESIGN-FOR-3-D-ON-URBAN-H%C3%A1jek-Jedli%C4%8Dka/b9074e3b44cf7f1e8a0c6761f32b2c9694b0cb89>
- HANSEN, Rex, 2020. Announcing the first beta release of the ArcGIS Maps SDK for game engines. *ArcGIS Blog*. Online. [vid. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/developers/announcements/announcing-the-first-beta-release-of-the-arcgis-maps-sdk-for-game-engines/>
- HARRAP, Rob; D. HUTCHINSON; Z SALA; M ONDERCIN a Paul-Mark DIFRANCESCO, 2019. Our GIS is a Game Engine: Bringing Unity to Spatial Simulation of Rockfalls. In: .

- HARTMANN, André; Gotthard MEINEL; Robert HECHT a Martin BEHNISCH, 2016. A Workflow for Automatic Quantification of Structure and Dynamic of the German Building Stock Using Official Spatial Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Online. 5, 142. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi5080142
- HAVEL, Petr, 2025. *3D geovizualizace meteorologických a klimatických dat v Google Earth*. Online. No publisher [vid. 2025-12-16]. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/210erf/?isslret=Petr%3BHAVEL%3B;zpet=%2Fvyhledavani%2F%3Fsearch%3Dpetr%20havel%26start%3D1>
- HEITZLER, Magnus; Juan LAM; Jürgen HACKL; Bryan ADEY a Lorenz HURNI, 2017. A Simulation and Visualization Environment for Spatiotemporal Disaster Risk Assessments of Network Infrastructures. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. Online. 52, 349–363. Dostupné z: doi:10.3138/cart.52.4.2017-0009
- HERBERT, Grant a Xuwei CHEN, 2015. A comparison of usefulness of 2D and 3D representations of urban planning. *Cartography and Geographic Information Science*. Online. 42(1), 22–32. ISSN 1523-0406. Dostupné z: doi:10.1080/15230406.2014.987694
- HERMAN, Lukáš, 2018. *User Issues of Interactive 3D Geovisualizations*. Online. No publisher [vid. 2023-06-05]. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/veajvp>
- HIRT, Christian, 2016. Digital Terrain Models. *Encyclopedia of Geodesy*. Online. ISSN 978-3-319-02370-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-02370-0_31-1
- HOLUB, Radim, 2024. *Vizualizace aktuálních fyzickogeografických podmínek v detailním 3D modelu území*. Online. No publisher [vid. 2025-04-03]. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/qqikzc/>
- HOLUBEC, František, 2022. *Geovizualizace v prostředí virtuální reality*. Online. No publisher [vid. 2025-04-03]. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/qox1v/>
- CHRISTOPHE, Sidonie; Jacques GAUTIER; Paul CHAPRON; Luke RILEY a Valéry MASSON, 2022. 3D geovisualization for visual analysis of urban climate. *Cybergeo*. Online. Dostupné z: doi:10.4000/cybergeo.38518
- ICA, 2026. *ICA Commission on Geovisualization*. Online. Dostupné z: <https://viz.icaci.org/>
- IPR PRAHA, 2019. Budovy 3D. *Otevřená data | Geoportál hl. m. Prahy*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.geoportalpraha.cz/cs/data/otevrena-data/44EE8B0A-641A-45E8-8DC9-CF209ED00897>
- IPR PRAHA, 2023. *3D model Prahy*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://app.iprpraha.cz/apl/app/model3d/>
- JAHNKE, Mathias; Jukka Matthias KRISP a Holger KUMKE, 2011. How Many 3D City Models Are There? – A Typological Try. *The Cartographic Journal*. Online. 48(2), 124–130. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1179/1743277411Y.0000000010
- JAKOBI, Ákos a József NEMES NAGY, 2006. Digital surface in social geography. *Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszékének évkönyve*. 193–200. ISSN 0495-1719.
- JANEČKA, Karel a Libor VÁŠA, 2017. Compression of 3D Geographical Objects at Various Level of Detail. In: . Online. s. 359–372. ISBN 978-3-319-45122-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-45123-7_26
- JANOVSKÝ, Michal, 2024. Pre-Dam Vltava River Valley—A Case Study of 3D Visualization of Large-Scale GIS Datasets in Unreal Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Online. 13(10), 344. ISSN 2220-9964. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi13100344
- JEDLIČKA, Karel; Tomáš ANDRŠ; Otakar ČERBA; Tomáš MILDORF; Daniel BERAN; Pavel HÁJEK a Michal KEPKA, 2024. INTERACTIVE CARTOGRAPHY OF AIR QUALITY: A METHOD FOR TRAFFIC POLLUTION ANALYSIS. *Proceedings, 9th International Conference on Cartography and GIS, 16-21 June 2024, Nessebar, Bulgaria*. 373–385. ISSN 1314-0604.
- JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, Sergio; Waldo OJEDA; Mariana MARCIAL a Juan ENCISO, 2021. Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Online. 10, 285. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi10050285
- KAM BRNO, 2023. *3D MODEL MĚSTA BRNA*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <http://webmaps.kambrno.cz/3d-model/>

- KAŇOK, Jaromír, 1992. *Kvantitativní metody v geografii*. Ostrava: Ethics. ISBN 80-7042-700-0.
- KAPOUNKOVÁ, Andrea, 2018. *Aplikace metody geodesign v českém územním plánování*. Online. No publisher [vid. 2023-06-07]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/4evisd>
- KHAYYAL, Heba; Zaki ZIDAN a Ashraf BESHAR, 2022. Creation and Spatial Analysis of 3D City Modeling based on GIS Data. *Civil Engineering Journal*. Online. 8, 105–123. Dostupné z: doi:10.28991/CEJ-2022-08-01-08
- KLIPPEL, Alexander; Chris WEAVER a Anthony C. ROBINSON, 2011. Analyzing Cognitive Conceptualizations Using Interactive Visual Environments. *Cartography and Geographic Information Science*. Online. 38(1), 52–68. ISSN 1523-0406. Dostupné z: doi:10.1559/1523040638152
- KNUST, Claudia a Manfred F. BUCHROITHNER, 2014. Principles and Terminology of True-3D Geovisualisation. *The Cartographic Journal*. Online. 51(3), 191–202. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1179/1743277413Y.0000000038
- KONÍČEK, Jakub, 2024. *VIZUÁLNÁ ANALÝZA PRI IDENTIFIKÁCI INFOGRAFIKY V KARTOGRAFII*. Online. No publisher [vid. 2024-09-16]. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/4bq13e>
- KRAAK, M., 2003. The space - time cube revisited from a geovisualization perspective. In: . Online. [vid. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-space-time-cube-revisited-from-a-perspective-Kraak/477b93ca731660db9b91412143efec424d1d7bfa>
- KRAAK, M. J., 1998. Exploratory cartography: maps as tools for discovery. In: *British Cartographic Society 35th Annual Symposium and Map Curators' Group Workshop*. Online. [vid. 2024-09-18]. Dostupné z: <https://research.utwente.nl/en/publications/exploratory-cartography-maps-as-tools-for-discovery-abstract>
- KRAAK, Menno-Jan a Ferjan ORMELING, 2020. *Cartography: Visualization of Geospatial Data, Fourth Edition*. Online. 4. vyd. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-0-429-46419-5. Dostupné z: doi:10.1201/9780429464195
- KREJČÍ, Martin, 2018. *Dynamické grafické proměnné ve 3D mapách*. Online. No publisher [vid. 2024-01-22]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/35lr4j/>
- KWAN, Mei-Po a Jiyeong LEE, 2003. Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach. *Spatially Integrated Social Science*. 27.
- LAMB, Richard, 2023. Virtual reality and science, technology, engineering, and mathematics education. Online. 189–197. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818630-5.13075-1
- LAVALLE, Steven M., 2023. *Virtual Reality*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <http://lavalle.pl/vr/>
- LEDOUX, Hugo; Ken OHORI; Kavisha KUMAR; Balázs DUKAI; Anna LABETSKI a Stelios VITALIS, 2019. CityJSON: a compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model. *Open Geospatial Data Software and Standards*. Online. 4, 4. Dostupné z: doi:10.1186/s40965-019-0064-0
- LI, Xinchuan; Youjing ZHANG; Xiuliang JIN; Qiaoning HE a Xiuping ZHANG, 2017. Comparison of digital elevation models and relevant derived attributes. *Journal of Applied Remote Sensing*. Online. 11, 1. Dostupné z: doi:10.1117/1.JRS.11.046027
- LIMBERGER, Daniel; Willy SCHEIBEL; Jürgen DÖLLNER a Matthias TRAPP, 2023. Visual variables and configuration of software maps. *Journal of Visualization*. Online. 26(1), 249–274. ISSN 1875-8975. Dostupné z: doi:10.1007/s12650-022-00868-1
- LIU, Xin; Xiangyu WANG; Graeme WRIGHT; Jack CHENG a Xiao LI, 2017. A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *International Journal of Geo-Information (IJGI)*. Online. 6, 53. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi6020053
- LONGLEY, Paul A.; Mike GOODCHILD; David J. MAGUIRE a David W. RHIND, 2010. *Geographic Information Systems & Science*. 3rd edition. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 978-0-470-72144-5.
- LUEBKE, David, 2012. *Level of Detail for 3D Graphics*. No publisher: Morgan Kaufmann. ISBN 978-0-12-399181-2.
- MACEACHREN, Alan a J.A. KRAAK, 2001. Research challenges in geovisualization. *Cartography Geograph. Inf. Sci.* 28, 3–12.

- MACEACHREN, Alan M., 2004. *How Maps Work: Representation, Visualization, and Design*. 1st edition. New York: The Guilford Press. ISBN 978-1-57230-040-8.
- MACEACHREN, Alan M. a Menno-Jan KRAAK, 1997. Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. *Computers & Geosciences*. Online. 23(4), Exploratory Cartographic Visualisation, 335–343. ISSN 0098-3004. Dostupné z: doi:10.1016/S0098-3004(97)00018-6
- MACEČEK, Martin, 2018. *Implementace prostředí interaktivní virtuální reality v 3D prostorové panoramatické aplikaci*. Online. No publisher [vid. 2023-06-05]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/sopeja/>
- MAO, Bo, 2010. Visualisation and Generalisation of 3D City Models. In: . Online. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Visualisation-and-Generalisation-of-3-D-City-Models-Mao/e0da186c37ca3494382ce9e3eb2f71b54742a82f>
- MAT, Ruzinoor Che; Abdul Rashid Mohammed SHARIFF; Abdul Nasir ZULKIFLI; Mohd Shafry Mohd RAHIM a Mohd Hafiz MAHAYUDIN, 2014. Using game engine for 3D terrain visualisation of GIS data: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Online. 20(1), 012037. ISSN 1755-1315. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/20/1/012037
- MEYER, Petr, 2017. 3D modely v geografii a jejich nevyužitý potenciál. *Geografické rozhledy*. 26, 20–21.
- MCHENRY, Kenton a Peter BAJCSY, 2008. An overview of 3D data content, file formats and viewers.
- MIRANDA, Fabio; Thomas ORTNER; Gustavo MOREIRA; Maryam HOSSEINI; Milena VUCKOVIC; Filip BILJECKI; Claudio T. SILVA; Marcos LAGE a Nivan FERREIRA, 2024. The State of the Art in Visual Analytics for 3D Urban Data. *Computer Graphics Forum*. Online. 43(3), e15112. ISSN 1467-8659. Dostupné z: doi:10.1111/cgf.15112
- MORRISON, Joel L, 1974. A theoretical framework for cartographic generalization with the emphasis on the process of symbolization. *International Yearbook of Cartography*. 14(1974), 115–27.
- MUŽÍK, František, 2025. Augmented Reality as a 3D Land Cover Visualisation Technique. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*. Online. 34, 29–41. Dostupné z: doi:10.14311/CEJ.2025.01.0003
- NASA, 2023. *NASA WorldWind*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://worldwind.arc.nasa.gov/>
- NATURE MEDIA, 2023. Předpovědní model počasí Aladin pro ČR je podrobnější. *Naše voda*. Online [vid. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/predpovedni-model-pocasi-aladin-pro-cr-je-podrobnejsi/>
- NÉTEK, Rostislav a Tomáš BURIAN, 2018. *Free and open source v geoinformatice*. Olomouc: Univerzita Palackého. ISBN 978-80-244-5291-3.
- OGC, 2023. CityGML. *Open Geospatial Consortium*. Online. [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.ogc.org/standard/citygml/>
- OKOSHI, Takanori, 1976. *Three-Dimensional Imaging Techniques*. New York: Academic Press. ISBN 978-0-323-15132-0.
- ONDREJKA, Peter, 2021. *Cartographic Visual Analysis of Big Data Sets*. Brno. disertační. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- ONEGEO, 2023. Clean and Comprehensive Worldwide Building Footprints. *ONEGEO*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://onegeo.co/>
- OPŽP, 2023. ČHMÚ: Přesnější a výkonnější předpovědní model Aladin – Operační program Životní prostředí. Online. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://opzp.cz/projekt/chmu-predpovedni-model-aladin-je-presnejsi-a-vykonnejsi/>
- OSM, 2023. Simple 3D Buildings. *OpenStreetMap Wiki*. Online [vid. 2023-06-02]. Dostupné z: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Simple_3D_Buildings
- PLAČKOVÁ, Barbora, 2022. *Využití 3D vizualizací v územním plánování*. Online. No publisher [vid. 2023-06-07]. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/5ack82>
- PLHÁKOVÁ, Alena, 2021. *Učebnice obecné psychologie*. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-1499-3.
- POKORNÝ, Filip, 2023. Numerický model Aladin, ČHMÚ. *Meteorologická stanice Frýdlant*. Online [vid. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.pocasi-frydlant.cz/aladin.php>

- POPELKA, Stanislav, 2010. *Analýzy viditelnosti a jejich vizualizace*. Online. No publisher [vid. 2023-06-04]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/noe3ou>
- POPELKA, Stanislav a Alžběta BRYCHTOVA, 2013. Eye-tracking Study on Different Perception of 2D and 3D Terrain Visualisation. *The Cartographic Journal*. Online. 50(3), 240–246. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1179/1743277413Y.0000000058
- PRAVDA, Ján, 2006. *Metódy mapového vyjadrovania : klasifikácia a ukážky*. Bratislava: Geografický ústav Slovenskej akadémie vied.
- QGIS, 2023. *QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System*. Online [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://www.qgis.org/en/site/>
- RAE, Alasdair, 2016. *The Global Human Settlement Layer: an amazing new global population dataset*. Online. [vid. 2024-11-13]. Dostupné z: <http://www.statsmapsnpix.com/2016/10/the-global-human-settlement-layer.html>
- ROBINSON, Anthony, 2017. Geovisual Analytics. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. Online. 2017(Q3) [vid. 2023-04-27]. Dostupné z: doi:10.22224/gistbok/2017.3.6
- ROBINSON, Natalie; James REGETZ a Robert P. GURALNICK, 2014. EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Online. 87, 57–67. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.11.002
- ROTH, Robert E., 2017. Visual Variables. In: *International Encyclopedia of Geography*. Online. No publisher: John Wiley & Sons, Ltd, s. 1–11 [vid. 2023-04-27]. ISBN 978-1-118-78635-2. Dostupné z: doi:10.1002/9781118786352.wbieg0761
- SEMMO, Amir; Matthias TRAPP; Markus JOBST a Jürgen DÖLLNER, 2015. Cartography-Oriented Design of 3D Geospatial Information Visualization – Overview and Techniques. *The Cartographic Journal*. Online. 52(2), 95–106. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1080/00087041.2015.1119462
- SHEPHERD, Ifan D. H., 2008. Travails in the Third Dimension: A Critical Evaluation of Three-Dimensional Geographical Visualization. In: *Geographic Visualization*. Online. No publisher: John Wiley & Sons, Ltd, s. 199–222 [vid. 2024-09-18]. ISBN 978-0-470-98764-3. Dostupné z: doi:10.1002/9780470987643.ch10
- SCHMIDT, Marcio a Luciene DELAZARI, 2010. Proposing of qualitative testing methodology for 3D Maps. *Boletim de Ciências Geodésicas*. Online. 16, 575–588. Dostupné z: doi:10.1590/S1982-21702010000400006
- SCHOBESBERGER, D. a T. PATTERSON, 2008. Evaluating the effectiveness of 2D VS. 3D trailhead maps: A map user study conducted at Zion National Park, United States. 42, 3–8.
- SIG3D, 2023. *SIG3D Special Interest Group 3D GDI-DE*. Online [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.sig3d.org/>
- SONG, Bingbing; Yanlin WANG a Fang LI, 2021. The Visualization Representation of Space-Time-Path in The Space-Time-Cube. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Online. 906(1), 012030. ISSN 1755-1315. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/906/1/012030
- STADT WIEN, 2023. *Stadtplan3D*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.wien.gv.at/stadtplan3d/>
- STATUTÁRNÍ MĚSTO BRNO, 2023. Průzkum budov v Brně / Buildings research in Brno (2018-2020). *Datový portál města Brna*. Online [vid. 2023-06-04]. Dostupné z: https://data.brno.cz/datasets/d3afcb7538e04a258353a56e9e94b9cd_0/explore?
- STAUFFER, Reto; Georg J. MAYR; Markus DABERNIG a Achim ZEILEIS, 2015. Somewhere Over the Rainbow: How to Make Effective Use of Colors in Meteorological Visualizations. Online. [vid. 2024-10-07]. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-D-13-00155.1
- STERNBERG, Robert J., 2011. *Cognitive Psychology*. 6th edition. Belmont, Calif: Cengage Learning. ISBN 978-1-133-31391-5.
- STÍSKALOVÁ, Petra, 2017. *Srovnání sociálních povrchů pro studium demografických jevů*. Online. No publisher. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Dostupné z: <https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/stiskalova17/index.html>

- STOTER, Jantien; Henk DE KLUIJVER a Vinaykumar KURAKULA, 2008. 3D noise mapping in urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*. Online. 22(8), 907–924. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658810701739039
- TERRIBILINI, A., 2001. *Entwicklung von Arbeitsabläufen zur automatischen Erstellung von interaktiven, vektorbasierten topographischen 3D-Karten. Dissertation*. Zurich. Institute of Cartography, ETH Zurich.
- THE PUDDING, 2024. *Human Terrain*. Online [vid. 2024-11-13]. Dostupné z: https://pudding.cool/2018/10/city_3d
- THOMAS, James J. a Kristin A. COOK, 2005. *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. Los Alamitos, Calif: National Visualization and Analytics Ctr. ISBN 978-0-7695-2323-1.
- TRHAN, Ondrej; Marek FRAŠTIA a Marián MARČIŠ, 2016. Tvorba priestorových modelov budov z dát získaných pomocou fotogrametrie UAV. *Kartografické listy*. 24(1), 35–45. ISSN 1336-5274.
- UN, 2023. WorldDEM™ (AIRBUS). *UN-SPIDER Knowledge Portal*. Online [vid. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.un-spider.org/links-and-resources/data-sources/worlddem%E2%84%A2-airbus>
- UNITY TECHNOLOGIES, 2023. Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D, VR & AR Engine. *Unity*. Online [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://unity.com>
- UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI, 2023. *Olomouc ve 3D*. Online [vid. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://3dolomouc.upol.cz/>
- US EPA, 2015. Visual Environment for Rich Data Interpretation (VERDI) program for environmental modeling systems. *U.S. Environmental Protection Agency*. Online [vid. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-research/visual-environment-rich-data-interpretation-verdi-program-environmental-modeling>
- US EPA, 2024. Meteorological Data and Processors. *U.S. Environmental Protection Agency*. Online [vid. 2025-01-07]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/scram/meteorological-data-and-processors>
- USGS, 2018. *USGS EROS Archive - Digital Elevation - Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)* | *U.S. Geological Survey*. Online [vid. 2026-01-19]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-multi-resolution-terrain-elevation>
- USGS, 2023. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global*. Online. tiff. 2023. No publisher: U.S. Geological Survey. [vid. 2023-06-01]. Dostupné z: doi:10.5066/F7PR7TFT
- VANÍČEK, Tomáš, n.d. *Hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking*. No publisher. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky.
- VETTER, Mark, 2023. The usage of “fog” as a visual variable in 3D-cartographic virtual reality environments. *Abstracts of the ICA*. Online. 6, 1–2. Dostupné z: doi:10.5194/ica-abs-6-263-2023
- VOŽENÍLEK, Vít, 2005. *Cartography for GIS: Geovisualization and Map Communication*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého. ISBN 80-244-1047-8.
- VOŽENÍLEK, Vít; Jaromír KAŇOK a A KOL., 2011. *Metody tematické kartografie: vizualizace prostorových jevů*. Online. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [vid. 2024-09-19]. ISBN 978-80-244-2790-4. Dostupné z: https://library.upol.cz/arl-upol/cs/detail-upol_us_cat-0067095-Metody-tematicke-kartografie/
- VRBKA, Radim, 2022. *Vliv interakce na práci s tematickými 3D mapami*. Online. No publisher [vid. 2024-04-01]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://theses.cz/id/2s9an7/>
- VUCKOVIC, Milena; Johanna SCHMIDT; Thomas ORTNER a Daniel CORNEL, 2021. Combining 2D and 3D Visualization with Visual Analytics in the Environmental Domain. *Information (Switzerland)*. Online. 13. Dostupné z: doi:10.3390/info13010007
- WANG, Xiangyu; Chansik PARK; Michael C.P. SING a Lei HOU, 2013. A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality. *Automation in Construction*. Online. 34, 37–44. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2012.10.012
- WENDEL, Jochen; Syed Monjur MURSHED; Akila SRIRAMULU a Alexandru NICHERSU, 2016. Development of a Web-Browser Based Interface for 3D Data—A Case Study of a Plug-in Free Approach for Visualizing Energy Modelling Results. In: . Online. s. 185–205. ISBN 978-3-319-19601-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-19602-2_12

- WMO, 2020. Climate data homogenization. *World Meteorological Organization*. Online [vid. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://community.wmo.int/en/climate-data-homogenization>
- YANG, Yalong; Tim DWYER; Bernhard JENNY; Kim MARRIOTT; Maxime CORDEIL a Haohui CHEN, 2018. Origin-Destination Flow Maps in Immersive Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Online. 25, 693–703. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2018.2865192
- YANG, Yalong; Tim DWYER; Kim MARRIOTT; Bernhard JENNY a Sarah GOODWIN, 2020. *Tilt Map: Interactive Transitions Between Choropleth Map, Prism Map and Bar Chart in Immersive Environments*. Online. Dostupné z: doi:10.48550/arXiv.2006.14120
- ZÁKOPČANOVÁ, Kristína, 2018. *Vizuální analýza dat pro kriminální vyšetřování*. Online. No publisher [vid. 2023-06-07]. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/nbqv95/>
- ZEJDLIK, Jakub a Vit VOZENILEK, 2024. Evaluation of 3D geovisualization of volumetric geospatial data in the form of horizontal planes using selected software. *Geographia Cassoviensis*. Online. 18(1), 5–25. Dostupné z: doi:10.33542/GC2024-1-01
- ZEJDLIK, Jakub a Vít VOZENILEK, 2025. Methods of 3D geovisualization of thematic data in the context of graphic variables. *International Journal of Cartography*. Online. 12(2), 195–210. ISSN 2372-9333. Dostupné z: doi:10.1080/23729333.2025.2555508
- ZIOLKOWSKA, Jad a Reuben REYES, 2016. Geological and hydrological visualization models for Digital Earth representation. *Computers & Geosciences*. Online. 94. Dostupné z: doi:10.1016/j.cageo.2016.06.003
- ZUO, Chenyu; Linfang DING; Zhuo YANG a Liqiu MENG, 2022. Multiscale geovisual analysis of knowledge innovation patterns using big scholarly data. *Annals of GIS*. Online. 28(2), 197–212. ISSN 1947-5683. Dostupné z: doi:10.1080/19475683.2022.2027012

SUMMARY

The presented **doctoral dissertation** comprehensively addresses the issue of **3D geovisualization of thematic data** and the process of **visual analysis in the third dimension**. The main objective of the thesis was to **create a theoretical and methodological concept** that would shift the perception of 3D maps from mere static or passive viewers to the role of **fully-fledged interactive analytical tools**. This objective was successfully achieved through a logical sequence of research steps that culminated in the **development of a custom software solution**.

In its initial phase, the research was anchored by an extensive **bibliometric analysis** and **literature review**, which helped identify **current trends**, **terminological inconsistencies**, and **existing gaps** in the fields of 3D cartography and visual analysis. This theoretical foundation was immediately followed by the creation of a **comprehensive methodology for evaluating graphic variables**. To make the concept practically applicable, the methodology was first pilot tested on the method of **horizontal planes**, which went hand in hand with a critical assessment of available technological platforms and the subsequent **selection of an optimal software** solution for future development. With the acquired technological and methodological knowledge, the research was then expanded to a total of **seven key 3D geovisualization methods** (horizontal planes, point clouds, 3D surfaces, vertical planes, 3D graduated symbols, prism maps, and voxels). The **procedure of creation was described** for each of these methods within the framework of the thesis.

A crucial step for verifying the proposed concepts was their **application in practice** and **interaction with end users**. On a **detailed (local) scale**, a case study was conducted for the **city of Jihlava**, focusing on the 3D geovisualization of the land suitability for housing. The inclusion of real 3D city models made it possible to demonstrate the necessity of **physical context** for thematic data. Furthermore, this case study was subjected to **user testing**, the results of which provided valuable feedback regarding **human perception of 3D space** and the comprehensibility of individual visualizations. Parallel to the theoretical research and case studies, the **development of the geovisualization environment** itself was underway. The first milestone was the creation of a **prototype web application, 3D-Geo-Vis⁷**. Targeted **usability testing was performed** on this prototype, which helped identify technological limitations and obstacles in the user interface.

The insights gained from the theoretical evaluations, user testing on the Jihlava data, and the usability testing of the prototype became the primary input for the **final synthesis of the entire dissertation—the development of the final application, 3D-Geo-Vis 2.0⁸**. The main added value of the 3D-Geo-Vis 2.0 geovisualization environment lies in the **unique integration of theoretical cartographic concepts with practical interactive visual analysis in a web-based 3D space**. Unlike many existing 3D viewers, which often serve only for the simple and static presentation of spatial data, this application was conceived

⁷ application: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis/horizontal.html
source codes: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis

⁸ application: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2
source codes: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2

from the outset as a comprehensive analytical tool. A fundamental scientific and methodological contribution is the **systematic implementation and evaluation of seven specific 3D geovisualization methods across a comprehensive set of sixteen graphic variables**. This approach provides users with exceptional flexibility and allows them to explore hidden spatial relationships and patterns in thematic data through targeted manipulation of the visual representation. The ability to interactively work with methods such as voxels, 3D surfaces, or vertical planes directly in a web browser fundamentally facilitates the interpretation of both the vertical and horizontal structures of phenomena. Another significant advantage is the **web-based nature of the application** itself—the utilization of available cloud technologies democratizes access to advanced 3D geovisualization, as it eliminates the need to install expensive and hardware-demanding desktop GIS software.

The **3D-Geo-Vis 2.0** application thus represents not only a **functional technological solution** but also a **verified methodological framework** that advances the possibilities of contemporary thematic 3D cartography. The dissertation has unequivocally demonstrated that the **active and targeted** manipulation of **graphic variable** parameters in an **interactive 3D environment** fundamentally **streamlines exploratory visual analysis**.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy

Příloha 1	dotazník k aplikaci „Jihlava – 3D geovizualizace územního potenciálu“
Příloha 2	dotazník použitelnosti – 3D-Geo-Vis
Příloha 3	programové kódy prototypu 3D geovizualizačního prostředí (3D-Geo-Vis)
Příloha 4	programové kódy finálního 3D geovizualizačního prostředí (3D-Geo-Vis 2.0)

Struktura digitálního média

- | | |
|-----------------------------|---|
| • text_prace.pdf | digitální verze textu disertační práce |
| • vysledky | adresář s výsledky práce |
| • dc3_ps1_Jihlava.xlsx | odpovědi z dotazníku (DC3, PS1) |
| • dc3_ps2_3DGeoVis_odp.xlsx | odpovědi z dotazníku (DC3, PS2) |
| • dc3_ps2_3DGeoVis_UEQ.xlsx | vyhodnocení dotazníku pomocí metrik (DC3, PS2) |
| • 3DGeoVis | adresář s programovými kódy nástroje 3D-Geo-Vis |
| • 3DGeoVis2 | adresář s programovými kódy nástroje 3D-Geo-Vis 2.0 |

Dotazník k aplikaci „Jihlava – 3D geovizualizace územního potenciálu“

3D geovizualizace územního potenciálu

Tento dotazník se zaměřuje na **hodnocení využitelnosti 3D vizualizačních metod pro vrstvy územního potenciálu**. Doba vyplnění je maximálně **30 minut** a dotazník je zcela anonymní.

V rámci dotazníku bude hodnoceno **celkem sedm metod 3D geovizualizací**. **Doporučujeme nejprve se seznámit s metodami a prostředím aplikace, a poté se pokusit vyhodnotit územní potenciál na Vámi zvoleném místě**. Některé vizualizace se mohou z důvodu datové náročnosti déle načítat, proto prosíme o trpělivost.

Metody **3D geovizualizací** jsou ukázány na **územním potenciálu pro bydlení** na katastrálním území Jihlava pro roky 2023, 2028 a 2033. Kromě vrstev potenciálu jsou také **vizualizovány jeho změny** mezi roky 2023 až 2028 a 2023 až 2033.

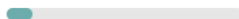
Hodnoty územního potenciálu jsou důležité zejména v rozvojových oblastech (Development Areas). Na základě těchto hodnot je poté možné činit rozhodnutí, v jaké rozvojové oblasti je výhodné investovat.

Pro potřeby výzkumu byla **vytvořena webová mapová aplikace**, která je dostupná na: [Jihlava – 3D geovizualizace územního potenciálu](#)

Vaše odpovědi pomohou ve výzkumu vhodnosti 3D geovizualizace územního potenciálu.
Předem děkujeme za vyplnění!

O. Bittner a J. Žejdlík

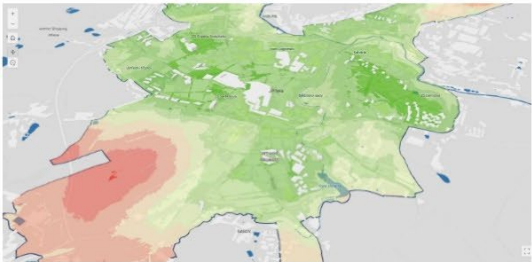
Další



Strana 1 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

Horizontální roviny



Jak se vám s touto metodou pracuje?*



Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*



Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*



Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "Horizontální roviny"?

- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Rozlišení** - Detaily objektů, vyšší rozlišení znamená podrobnější informace.
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. zobrazení vrstvy 5 metrů nad povrchem).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Rozlišení	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

255

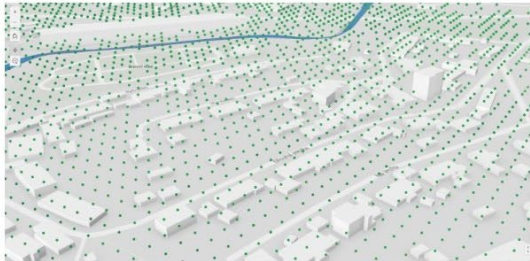
Zpět

Další

Strana 2 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

Mračno bodů



Jak se vám s touto metodou pracuje?*



Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*



Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*



Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "Mračno bodů"?

- **Velikost** - Vyjadřuje velikost objektu ve 2D (např. průměr bodu).
- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. světlá - nízký, tmavá - vysoký).
- **Uspořádání** - Rozložení objektů v prostoru (body mohou být uspořádány pravidelně nebo nepravidelně).
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. proměnlivá výška bodů na základě územního potenciálu).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Velikost	☐	☐	☐	☐	☐
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Uspořádání	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

255

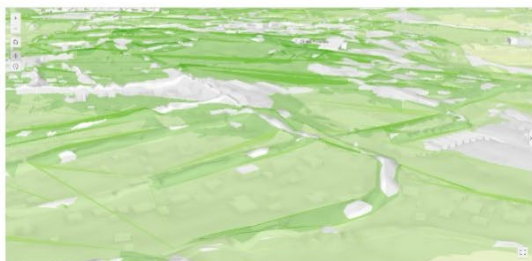
Zpět

Další

Strana 3 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

3D povrch



Jak se vám s touto metodou pracuje?*

Velmi špatně Špatně Neutrálně Dobře Velmi dobře

Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "3D povrch"?

- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Rozlišení** - Detaily objektů, vyšší rozlišení znamená podrobnější informace.
- **Výška** - U 3D povrchu je výška buněk proměnlivá na základě hodnoty územního potenciálu (čím vyšší potenciál, tím výše je daná buňka v rámci vizualizace).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Rozlišení	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

255

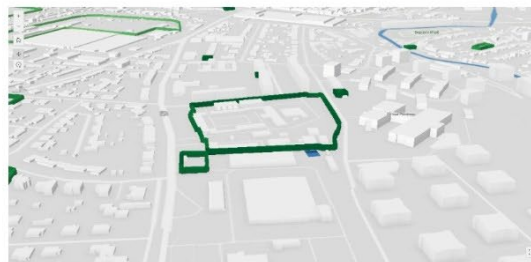
Zpět

Další

Strana 4 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

Vertikální roviny



Jak se vám s touto metodou pracuje?*

Velmi špatně Špatně Neutrálně Dobře Velmi dobře

Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*

Nesouhlasím Spíše nesouhlasím Nevím Spíše souhlasím Souhlasím

Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "Vertikální roviny"?

- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. zobrazení vrstvy 10 metrů nad povrchem).
- **Extruze** - Vyjadřuje velikost objektu ve 3D - rozšíření 2D objektu do třetího rozměru (např. „vytlačení“ linie do výšky na základě hodnoty územního potenciálu vzniknou roviny s proměnlivou výškou).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Extruze	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

255

Zpět

Další

Strana 5 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

3D kartodiagram



Jak se vám s touto metodou pracuje?*



Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*



Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*



Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "3D kartodiagram"?

- **Velikost** - Vyjadřuje velikost objektu ve 2D (např. průměr sloupce).
- **Tvar** - 3D kartodiagramy mohou mít mnoho podob (např. sloupce, kruhy, jehly, kvádry).
- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Uspořádání** - Rozložení objektů v prostoru - 3D kartodiagramy mohou být rozmístěny pravidelně, nepravidelně nebo v konkrétních lokalitách.
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. zobrazení vrstvy 10 metrů nad povrchem).
- **Extruze** - Vyjadřuje velikost objektu ve 3D - rozšíření 2D objektu do třetího rozměru (např. „vytlačení“ kruhu do výšky na základě hodnoty územního potenciálu vzniknou sloupce s proměnlivou výškou).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Velikost	☐	☐	☐	☐	☐
Tvar	☐	☐	☐	☐	☐
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Uspořádání	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Extruze	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

Zpět

Další

Strana 6 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

3D kartogram



Jak se vám s touto metodou pracuje?*



Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*



Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*



Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "3D kartogram"?

- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. zobrazení vrstvy 10 metrů nad povrchem).
- **Extruze** - Vyjadřuje velikost objektu ve 3D - rozšíření 2D objektu do třetího rozměru (např. „vytlačení“ plochy do výšky na základě hodnoty územního potenciálu vzniknou plochy s proměnlivou výškou).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Extruze	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

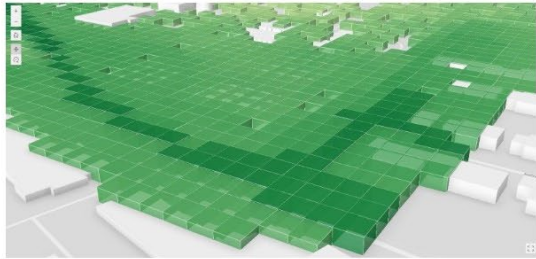
Zpět

Další

Strana 7 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

Voxely



Jak se vám s touto metodou pracuje?*



Vystihuje metoda vhodně územní potenciál?*



Byli jste schopni správně určit hodnoty územního potenciálu?*



Jak byste zhodnotili významnost grafických proměnných pro metodu "Voxely"?

- **Velikost** - Vyjadřuje velikost objektu ve 2D (např. velikost čtverce).
- **Barva** - Barevné vyjádření územního potenciálu (např. červená - nízký, zelená - vysoký).
- **Průhlednost** - Průhledné objekty umožňují vidět vrstvy pod nimi.
- **Výška** - Určuje vertikální rozměr znaku (např. zobrazení vrstvy 10 metrů nad povrchem).
- **Extruze** - Vyjadřuje velikost objektu ve 3D - rozšíření 2D objektu do třetího rozměru (např. „vytlačení“ čtverce do výšky na základě hodnoty územního potenciálu vzniknou kvádry s proměnlivou výškou).
- **Kamera** - Místo, odkud se uživatel na objekt nebo scénu dívá. Ve 3D prostředí je důležitá interaktivní kamera, kterou může uživatel sám ovládat.

	Nevýznamné	Spíše nevýznamné	Neutrální	Spíše významné	Významné
Velikost	☐	☐	☐	☐	☐
Barva	☐	☐	☐	☐	☐
Průhlednost	☐	☐	☐	☐	☐
Výška	☐	☐	☐	☐	☐
Extruze	☐	☐	☐	☐	☐
Kamera	☐	☐	☐	☐	☐

Stručně slovně ohodnoťte tuto vizualizaci.

Zpět

Další

Strana 8 z 9

3D geovizualizace územního potenciálu

Celkové zhodnocení

METODY 3D GEOVIZUALIZACE TEMATICKÝCH DAT			
horizontální roviny	mračno bodů	3D povrch	vertikální roviny
3D kartodiagram	3D kartogram	voxely	

Ohodnoťte každou metodu 3D geovizualizace na stupnici od 1 (nejlepší) do 5 (nejhorší).

	1	2	3	4	5
Horizontální roviny	☐	☐	☐	☐	☐
Mračno bodů	☐	☐	☐	☐	☐
3D povrch	☐	☐	☐	☐	☐
Vertikální roviny	☐	☐	☐	☐	☐
3D kartodiagram	☐	☐	☐	☐	☐
3D kartogram	☐	☐	☐	☐	☐
Voxely	☐	☐	☐	☐	☐

Celkově zhodnoťte vizualizace a seřaďte je od nejlepší po nejhorší na základě vašeho subjektivního pocitu.*

3D povrch

Horizontální roviny

3D kartogram

Voxely

Mračno bodů

3D kartodiagram

Vertikální roviny

Obnovit

Považujete možnost vizualizace územního potenciálu ve 3D za smysluplnou?

1000

Pracujete s 3D vizualizacemi/modely?*

☐ Ano

☐ Ne

Máte již zkušenosti s mapami územního potenciálu?*

☐ Ano

☐ Ne

Jaká je vaše role v územním plánování?*

☐ Urbanista/územní plánovač

☐ GIS specialista

☐ Odborník na životní prostředí

☐ Architekt

☐ Jiná (uvedte):

Zpět

Odeslat dotazník

Strana 9 z 9

Dotazník použitelnosti – 3D-Geo-Vis

[illegible]

13) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

1 2 3 4 5 6 7

složitý ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ jednoduchý

14) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

1 2 3 4 5 6 7

odpudivý ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ přitažlivý

15) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

16) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

1 2 3 4 5 6 7

protivný ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ milý

17) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

	1	2	3	4	5	6	7
jistý	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
nejistý							

18) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

19) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

splňuje očekávání 1 2 3 4 5 6 7 nesplňuje očekávání

20) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

21) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

22) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

1 2 3 4 5 6 7

nepraktický ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ praktický

23) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

24) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

25) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

26) Nyní prosím ohodnoťte produkt tím, že na každém řádku označíte jeden kroužek. *

[illegible]

Příloha 3

Programové kódy prototypu 3D geovizualizačního prostředí (3D-Geo-Vis)

Níže jsou uvedeny programové kódy pro metodu 3D kartodiagram (3D Graduated Symbols) jakožto příklad. Z důvodu rozsahu práce nejsou zahrnuty kódy pro ostatní metody, které jsou ale dostupné na GitHub: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis.

HTML

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <meta charset="utf-8" />
    <title>3D-Geo-Vis</title>
    <link rel="stylesheet" href="style.css" />
    <link rel="stylesheet" href="https://js.arcgis.com/4.29/esri/themes/light/main.css" />
    <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Open+Sans:wght@400;700&display=swap"
rel="stylesheet">
    <script src="https://js.arcgis.com/4.29/"></script>
    <link rel="icon" href="favicon.png" type="image/png">
  </head>
  <body>
    <div id="headerBar">
      <span class="header-app-title">3D-Geo-Vis</span>
      <div class="header-right-controls">
        <div class="header-nav-links">
          <a href="horizontal.html" class="nav-link">Horizontal Planes</a>
          <a href="point_cloud.html" class="nav-link">Point Cloud</a>
          <a href="3D_surface.html" class="nav-link">3D Surface</a>
          <a href="vertical.html" class="nav-link">Vertical Planes</a>
          <a href="3D_graduated.html" class="nav-link active-nav-link">3D Graduated Symbols</a>
          <a href="prism.html" class="nav-link">Prism Map</a>
          <a href="voxels.html" class="nav-link">Voxels</a>
        </div>
        <button id="helpButton" class="header-button esri-icon-question" title="Help"></button>
      </div>
    </div>

    <div id="viewDiv"></div>

    <div id="symbologyEditorPanel" class="panel">
      <div class="panel-header">
        </div>
      <div class="panel-content">
        <h3 id="symbologyPanelTitle">Edit Symbology: 3D Graduated Symbols</h3>
        <div id="symbologyControls">
          <h2>Color Ramp</h2>
          <div class="color-pickers-wrapper">
            <input type="color" id="startColorPicker" value="#4575b4">
            <input type="color" id="middleColorPicker" value="#ffffbf">
            <input type="color" id="endColorPicker" value="#d73027">
          </div>
          <div id="colorRampPreview"></div>
          <hr>

          <h2>Transparency</h2>
          <input type="range" id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><br>
          <hr>

          <h2>Diameter</h2>
          <label for="diameterInput">Diameter (m):</label>
          <input type="number" id="diameterInput" value="80000" min="0" step="1000"><br>
        </div>
      </div>
    </div>
  </body>
</html>
```

```

<hr>

<h2>Extrusion</h2>
<label for="minZOffsetInput">Base Height:</label>
<input type="number" id="minZOffsetInput" value="0" min="-100000" step="1000"><br>
<label for="maxZOffsetInput">Extrusion:</label>
<input type="number" id="maxZOffsetInput" value="500000" min="-100000"
step="1000"><br>
<hr>

<h2>Height (Elevation)</h2>
<label for="heightAboveGroundInput">Height Above Ground (m):</label>
<input type="number" id="heightAboveGroundInput" value="0" step="1000" min="-1000000"
max="1000000"><br>
<hr>

<h2>Shape</h2>
<select id="shapeSelect">
  <option value="cylinder">Cylinder</option>
  <option value="cone">Cone</option>
  <option value="inverted-cone">Inverted Cone</option>
  <option value="tetrahedron">Tetrahedron</option>
</select>
</div>
<div id="symbologyNotSupportedMessage" style="display:none;">
  Symbology editing is not supported for this layer type.
</div>
</div>
</div>

<div id="helpModalOverlay" class="modal-overlay">
  <div id="helpModal" class="help-modal">
    <button id="closeHelpModal" class="close-button">&times;</button>
    <h3>Controls</h3>
    <p><strong>Pan:</strong> Click and drag the left mouse button.</p>
    <p><strong>Tilt / Rotate:</strong> Click and drag the right mouse button.</p>
    <p><strong>Zoom:</strong> Scroll the mouse wheel, or use the <code>+</code>/<code>-</code>
    buttons in the navigation widget, or double-click to zoom in.</p>
    <p><strong>Select:</strong> Click on a feature to view its pop-up.</p>
    <p><strong>Symbology Panel:</strong> Use the panel on the right to customize symbology
    of the data.</p>

    <hr> <p style="color:grey"><b>Data:</b> Air Temperature on January 1, 2014 in 00:00</p>
    <p style="color:grey"><b>Author:</b> Jakub Žejdlík (jakub.zejdlík@upol.cz)</p>
    <p style="color:grey">Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký
    University Olomouc</p>
  </div>
</div>

<script src="3D_graduatedJS.js"></script>
</body>
</html>

```

JavaScript

```

document.addEventListener("DOMContentLoaded", function() {
  require([
    "esri/Map",
    "esri/views/SceneView",
    "esri/layers/FeatureLayer",
    "esri/widgets/Home",
    "esri/widgets/BasemapGallery",
    "esri/widgets/Expand",
    "esri/widgets/Legend",
    "esri/symbols/ObjectSymbol3DLayer",
    "esri/symbols/PointSymbol3D"
  ], function() {
    // Map initialization code
  });
});

```

```

], function(Map, SceneView, FeatureLayer, Home, BasemapGallery, Expand, Legend,
ObjectSymbol3DLayer, PointSymbol3D) {

    const map = new Map({ basemap: "topo-vector", ground: "world-elevation" });

    const euGraduatedSymbolsLayer = new FeatureLayer({
        url:
"https://services1.arcgis.com/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_3D_graduated/FeatureSer
ver/0",
        outFields: ["*"], visible: true, title: "3D Graduated Symbols",
        popupTemplate: { title: "{NAME}", content: "Temperature: {Temperature}<br>" },
        labelingInfo: [{
            labelExpressionInfo: { expression: "$feature.NAME" },
            symbol: { type: "label-3d", symbolLayers: [{ type: "text", material: { color: "#646464"
}, size: 10, halo: { color: "white", size: 1 }, font: { weight: "bold" } } ] }
        ]},
        renderer: {
            type: "simple",
            symbol: { type: "point-3d", symbolLayers: [{ type: "object", resource: { primitive:
"cylinder" }, material: { color: "white" }, width: 80000 } ] },
            visualVariables: [
                { type: "color", field: "Temperature",
                    stops: [{ value: 269, color: "#4575b4" }, { value: 277, color: "#ffffbf" }, { value:
286, color: "#d73027" } ] },
                { type: "opacity", field: "Temperature", stops: [{ value: 269, opacity: 1 }, { value:
288, opacity: 1 } ] },
                { type: "size", field: "Temperature", axis: "height", stops: [{ value: 269, size: 0
}, { value: 286, size: 500000 } ] },
                { type: "size", axis: "width-and-depth", useSymbolValue: true }
            ]
        },
        elevationInfo: { mode: "relative-to-ground", offset: 0 }
    });

    map.add(euGraduatedSymbolsLayer);

    const view = new SceneView({
        container: "viewDiv", map,
        camera: { position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 15000000 }, tilt: 0, heading: -1 },
        constraints: { rotationEnabled: true },
        qualityProfile: "high"
    });

    view.ui.add(new Home({ view }), "top-left");
    const bg = new BasemapGallery({ view });
    view.ui.add(new Expand({ view, content: bg, expandIconClass: "esri-icon-basemap" }), "top-
left");
    const legend = new Legend({ view, layerInfos: [{ layer: euGraduatedSymbolsLayer, title: "3D
Graduated Symbols" } ] });
    view.ui.add(new Expand({ view, content: legend, expandIconClass: "esri-icon-legend" }),
"bottom-left");

    const startColorPicker = document.getElementById("startColorPicker");
    const middleColorPicker = document.getElementById("middleColorPicker");
    const endColorPicker = document.getElementById("endColorPicker");
    const transparencyInput = document.getElementById("transparencyInput");
    const minZOffsetInput = document.getElementById("minZOffsetInput");
    const maxZOffsetInput = document.getElementById("maxZOffsetInput");
    const colorRampPreview = document.getElementById("colorRampPreview");
    const heightAboveGroundInput = document.getElementById("heightAboveGroundInput");
    const diameterInput = document.getElementById("diameterInput");
    const shapeSelect = document.getElementById("shapeSelect");

    const helpButton = document.getElementById("helpButton");
    const helpOverlay = document.getElementById("helpModalOverlay");
    const helpModal = document.getElementById("helpModal");

```

```

const closeHelpModalBtn = document.getElementById("closeHelpModal");

const TEMP_MIN = 269, TEMP_MID = 277, TEMP_MAX = 286;
let booting = true;

function updateColorRampPreview(stops) {
  if (!colorRampPreview) return;
  const colors = stops.map(s => s.color && s.color.toHex ? s.color.toHex() : s.color);
  colorRampPreview.style.background = `linear-gradient(to right, ${colors.join(", ")});`
}

function updatePreviewFromInputs() {
  updateColorRampPreview([
    { value: TEMP_MIN, color: startColorPicker?.value || "#4575b4" },
    { value: TEMP_MID, color: middleColorPicker?.value || "#ffffbf" },
    { value: TEMP_MAX, color: endColorPicker?.value || "#d73027" }
  ]);
}

function debounce(fn, d = 100) { let t; return (...a) => { clearTimeout(t); t = setTimeout(() => fn(...a), d); } };

function buildPoint3DSymbol(primitive, diameter) {
  const obj = new ObjectSymbol3DLayer({
    resource: { primitive },
    material: { color: "white" },
    width: diameter,
    depth: diameter
  });
  return new PointSymbol3D({ symbolLayers: [obj] });
}

function buildRenderer(base) {
  const r = base.clone();
  const prim = String(shapeSelect?.value || "cylinder").toLowerCase();
  const diam = Number(diameterInput?.value) || 80000;
  r.symbol = buildPoint3DSymbol(prim, diam);

  let colorVV = r.visualVariables.find(v => v.type === "color");
  if (!colorVV) { colorVV = { type: "color", field: "Temperature", stops: [] };
  r.visualVariables.push(colorVV); }
  colorVV.field = "Temperature";
  colorVV.stops = [
    { value: TEMP_MIN, color: startColorPicker?.value || "#4575b4" },
    { value: TEMP_MID, color: middleColorPicker?.value || "#ffffbf" },
    { value: TEMP_MAX, color: endColorPicker?.value || "#d73027" }
  ];

  let sizeH = r.visualVariables.find(v => v.type === "size" && v.axis === "height");
  if (!sizeH) { sizeH = { type: "size", axis: "height", field: "Temperature", stops: [] };
  r.visualVariables.push(sizeH); }
  const minH = Number(minZOffsetInput?.value) || 0;
  const maxH = Number(maxZOffsetInput?.value) || 500000;
  sizeH.field = "Temperature";
  sizeH.stops = [{ value: TEMP_MIN, size: minH }, { value: TEMP_MAX, size: maxH }];

  return r;
}

function applyAll() {
  if (booting) return;
  euGraduatedSymbolsLayer.renderer = buildRenderer(euGraduatedSymbolsLayer.renderer);
  const op = Number(transparencyInput?.value);
  euGraduatedSymbolsLayer.opacity = Number.isFinite(op) ? op : 1;
  const offset = Number(heightAboveGroundInput?.value);
  euGraduatedSymbolsLayer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset:
  Number.isFinite(offset) ? offset : 0 };
}

```

```

const applyWithPreviewDebounce = debounce(() => {
  updatePreviewFromInputs();
  if (!booting) applyAll();
}, 100);

updatePreviewFromInputs();
const openHelp = () => { if (!helpOverlay) return; helpOverlay.style.display = "flex";
helpOverlay.setAttribute("aria-hidden", "false"); };
const closeHelp = () => { if (!helpOverlay) return; helpOverlay.style.display = "none";
helpOverlay.setAttribute("aria-hidden", "true"); };
helpButton?.addEventListener("click", e => { e.preventDefault(); openHelp(); });
closeHelpModalBtn?.addEventListener("click", e => { e.preventDefault(); closeHelp(); });
helpOverlay?.addEventListener("click", e => { if (e.target === helpOverlay) closeHelp();
});
window.addEventListener("keydown", e => { if (e.key === "Escape") closeHelp(); });
helpModal?.addEventListener("click", e => e.stopPropagation());

startColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
applyWithPreviewDebounce(); });
middleColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
applyWithPreviewDebounce(); });
endColorPicker?.addEventListener("input", () => { updatePreviewFromInputs();
applyWithPreviewDebounce(); });
transparencyInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
minZOffsetInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
maxZOffsetInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
heightAboveGroundInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
diameterInput?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
shapeSelect?.addEventListener("input", applyWithPreviewDebounce);
shapeSelect?.addEventListener("change", applyWithPreviewDebounce);

view.when(async () => {
  await view.whenLayerView(euGraduatedSymbolsLayer).catch(() => {});
  try {
    await view.goTo({ position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 6000000 }, tilt: 0,
heading: -1 }, { duration: 5000 });
  } catch (e) {}
  booting = false;
  applyAll();
});
});
});

```

CSS

```

*,
*:before,
*:after {
  box-sizing: border-box;
}

:root {
  --header-h: 50px;
}

html, body {
  margin: 0;
  padding: 0;
  height: 100%;
  width: 100%;
  font-family: 'Open Sans', sans-serif;
}
#viewDiv {
  position: absolute;
  top: var(--header-h);

```

```

    left: 0;
    right: 280px;
    bottom: 0;
}

#headerBar {
    position: absolute;
    top: 0;
    left: 0;
    right: 0;
    height: var(--header-h);
    background-image: linear-gradient(to right, #00467f, #005a9b);
    color: white;
    padding: 0 10px;
    z-index: 100;
    box-shadow: 0 4px 8px rgba(0,0,0,0.15);
    display: flex;
    align-items: center;
    justify-content: space-between;
}

.header-app-title {
    font-size: 20px;
    font-weight: bold;
    line-height: var(--header-h);
    flex-shrink: 0;
}

.header-right-controls {
    display: flex;
    align-items: center;
    gap: 15px;
}

.header-nav-links {
    display: flex;
    align-items: center;
    gap: 15px;
    flex-shrink: 0;
}

.nav-link {
    color: white;
    text-decoration: none;
    padding: 5px 10px;
    border-radius: 4px;
    transition: background-color 0.3s ease;
    font-size: 14px;
    font-weight: normal;
    white-space: nowrap;
    line-height: 1;
}

.nav-link:hover {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 0.2);
}

.nav-link.active-nav-link {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 0.3);
    font-weight: bold;
    border: 1px solid rgba(255, 255, 255, 0.5);
}

#helpButton {
    background-color: transparent;
    border: none;

```

```

    color: white;
    font-size: 24px;
    cursor: pointer;
    padding: 0 10px;
    flex-shrink: 0;
}

#helpButton:hover {
    color: #f0f0f0;
}

#symbologyEditorPanel {
    position: fixed;
    top: var(--header-h);
    right: 0;
    bottom: 0;
    background-color: #fefefe;
    padding: 20px;
    border-left: 1px solid #888;
    border-radius: 0;
    width: 280px;
    box-shadow: -4px 0 15px rgba(0,0,0,0.1);
    font-family: 'Open Sans', sans-serif;
    z-index: 110;
    overflow-y: auto;
}

#symbologyEditorPanel h3#symbologyPanelTitle {
    font-size: 22px;
    margin-top: 0;
    margin-bottom: 15px;
    color: #333;
}

#symbologyEditorPanel h3#symbologyPanelTitle + hr {
    margin-top: 15px;
    margin-bottom: 20px;
    border: 0;
    border-top: 1px solid #eee;
}

#symbologyEditorPanel h2:not(#symbologyPanelTitle) {
    font-size: 16px;
    color: #666;
    background-color: transparent;
    padding: 0;
    margin-top: 25px;
    margin-bottom: 15px;
    border-radius: 0;
    box-shadow: none;
    text-align: left;
}

#symbologyEditorPanel label {
    display: block;
    margin-bottom: 5px;
    font-size: 14px;
}

#symbologyEditorPanel input[type="number"] {
    width: 100%;
    padding: 8px;
    border: 1px solid #ccc;
    border-radius: 4px;
    font-size: 14px;
    margin-bottom: 10px;
}

```

```

}

.color-pickers-wrapper {
  display: flex;
  gap: 10px;
  margin-bottom: 15px;
  justify-content: space-around;
}

.color-pickers-wrapper input[type="color"] {
  flex-grow: 1;
  min-width: 50px;
  height: 35px;
  padding: 0;
  border: 1px solid #ccc;
  border-radius: 4px;
  cursor: pointer;
}

.color-input-group {
  display: flex;
  align-items: center;
  margin-bottom: 10px;
  flex-wrap: wrap;
  justify-content: space-between;
}

.color-input-group label {
  flex-basis: 100%;
  margin-bottom: 5px;
  margin-right: 0;
}

.color-input-group input[type="color"] {
  flex-grow: 1;
  min-width: 50px;
  height: 35px;
  padding: 0;
  border: 1px solid #ccc;
  border-radius: 4px;
  margin-bottom: 0;
}

#transparencyInput {
  width: 100%;
  margin-bottom: 10px;
}

#colorRampPreview {
  width: 100%;
  height: 20px;
  border: 1px solid #ccc;
  margin-top: 10px;
  margin-bottom: 15px;
  border-radius: 4px;
}

hr {
  border: 0;
  border-top: 1px solid #dcdcdc;
  margin: 25px 0;
}

.modal-overlay {
  display: none;
  position: fixed;

```

```

top: 0;
left: 0;
width: 100%;
height: 100%;
background-color: rgba(0, 0, 0, 0.6);
z-index: 1000;
justify-content: center;
align-items: center;
}

.help-modal {
background-color: white;
padding: 30px;
border-radius: 8px;
box-shadow: 0 5px 15px rgba(0, 0, 0, 0.3);
width: 90%;
max-width: 500px;
position: relative;
font-family: 'Open Sans', sans-serif;
color: #333;
}

.help-modal h3 {
margin-top: 0;
color: #00467f;
text-align: center;
margin-bottom: 20px;
}

.help-modal p {
margin-bottom: 10px;
line-height: 1.5;
font-size: 14px;
}

.help-modal p strong {
color: #005a9b;
}

.close-button {
position: absolute;
top: 10px;
right: 15px;
font-size: 28px;
font-weight: bold;
color: #aaa;
background: none;
border: none;
cursor: pointer;
}

.close-button:hover,
.close-button:focus {
color: #333;
text-decoration: none;
cursor: pointer;
}

```

Příloha 4

Programové kódy finálního 3D geovizualizačního prostředí (3D-Geo-Vis 2.0)

Tato příloha obsahuje zdrojové kódy aplikace 3D-Geo-Vis 2.0 platné k datu odevzdání této disertační práce. Vzhledem k tomu, že se předpokládá další vývoj a rozšiřování aplikace, je její kompletní a vždy aktuální verze trvale veřejně dostupná na GitHub: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2. Z důvodu rozsahu nejsou uvedeny HTML a CSS kódy pro web s metodologií aplikace.

HTML

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="utf-8" />
  <meta name="viewport" content="initial-scale=1, maximum-scale=1, user-scalable=no" />
  <title>3D-Geo-Vis 2.0</title>

  <link rel="stylesheet" href="https://js.arcgis.com/4.29/esri/themes/dark/main.css" />
  <link rel="stylesheet" href="style.css" />
  <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Open+Sans:wght@400;700&display=swap"
rel="stylesheet">

  <link rel="icon" href="favicon.png" type="image/png">

  <script src="https://js.arcgis.com/4.29/"></script>
</head>
<body>
  <div id="headerBar">
    <a href="#" id="home-link" class="header-app-title">3D-Geo-Vis 2.0</a>
    <div class="header-right-controls">
      <button id="addThematicLayerBtn" class="header-button esri-icon-plus-circled"
title="Add Thematic Layer"></button>
      <button id="addBuildingsBtn" class="header-button esri-icon-urban-model" title="Add
3D Buildings"></button>
      <button id="changeElevationBtn" class="header-button esri-icon-elevation-profile"
title="Change Elevation Layer"></button>

      <div class="header-separator"></div>

      <button id="shareLinkBtn" class="header-button esri-icon-share" title="Copy Share
Link"></button>
      <button id="helpButton" class="header-button esri-icon-question"
title="Help"></button>
      <button id="feedbackBtn" class="header-button esri-icon-comment" title="Send
Feedback"></button>

    </div>
  </div>

  <div id="viewDiv"></div>

  <div id="addLayerPanel" class="panel">
    <h3>Add Thematic Layer</h3>
    <label for="layerUrlInput">Feature Layer URL:</label>
    <input type="text" id="layerUrlInput" placeholder="https://...">
    <button id="loadLayerBtn">Load Layer</button>
    <div id="loadingMessage" style="display: none; color: var(--text-muted); margin-top:
10px; text-align: center;">
      Loading layer...
    </div>
  </div>
```

```

<div id="addBuildingsPanel" class="panel" style="display: none;">
  <h3>Add 3D Buildings</h3>
  <label for="buildingsUrlInput">Scene Layer URL:</label>
  <input type="text" id="buildingsUrlInput" placeholder="https://...">
  <button id="loadBuildingsBtn" class="primary-btn">Load Buildings</button>
  <div id="buildingsLoadingMessage" style="display: none; color: var(--text-muted);
margin-top: 10px; text-align: center;">
    Loading buildings...
  </div>
</div>

<div id="elevationPanel" class="panel" style="display: none;">
  <h3>Change Elevation Layer</h3>

  <div class="elevation-option">
    <input type="radio" id="defaultElevationRadio" name="elevation-type"
value="default" checked>
    <label for="defaultElevationRadio">Default Elevation</label>
  </div>

  <div class="elevation-option">
    <input type="radio" id="customElevationRadio" name="elevation-type" value="custom">
    <label for="customElevationRadio">Custom Elevation from URL</label>
  </div>

  <input type="text" id="elevationUrlInput" placeholder="https://..." disabled>

  <button id="applyElevationBtn" class="primary-btn">Apply</button>
  <div id="elevationLoadingMessage" style="display: none; color: var(--text-muted);
margin-top: 10px; text-align: center;">
    Loading elevation...
  </div>
</div>

<div id="methodSelectionPanel" class="panel" style="display: none;">
  <h3>Select Visualization</h3>
  <p id="method-selection-prompt" style="color: var(--text-muted); font-size: 14px;
margin-bottom: 15px;">
    Loaded layer. Please select a visualization method:
  </p>
  <div id="method-buttons-container">
    </div>
  <button id="cancelMethodBtn" class="secondary-btn">Cancel</button>
</div>

<div id="symbolologyEditorPanel" class="panel" style="display: none;">
  <h3 id="symbolologyPanelTitle">Symbolology</h3>
  <div id="symbolology-controls-container"></div>
  <button id="closeSymbolologyBtn">Done</button>
</div>

<div id="layerListPanel" class="panel">
  <h3>Active Layers</h3>
  <ul id="layer-list">
    <p class="placeholder-text">Use the buttons in the top bar to add thematic data,
add 3D buildings, or change the elevation layer.</p>
  </ul>
</div>

<div id="helpModalOverlay" class="modal-overlay">
  <div id="helpModal" class="help-modal">
    <button id="closeHelpModal" class="close-button">&times;</button>
    <h3>Methodology</h3>
    <p><strong><a href="methods.html" target="_blank" class="primary-btn" style="text-
decoration: none; display: inline-block; width: auto; padding: 10px 20px;">3D Geovisualization
Methods & Graphic Variables</a></strong></p>

```

```

<hr>
<h3>Controls</h3>
<p><strong>Pan:</strong> Click and drag the left mouse button.</p>
<p><strong>Tilt / Rotate:</strong> Click and drag the right mouse button.</p>
<p><strong>Zoom:</strong> Scroll the mouse wheel, or use the <code>+</code>/<code>-</code> buttons.</p>
<p><strong>Symbolology:</strong> Use the "Add Thematic Layer" button to add data (ArcGIS Online URL). Then, edit the symbology of each layer using the Edit icon in the "Active Layers" list.</p>

<hr>
<h3>Demo Data (Click to copy)</h3>
<p><strong>Points:</strong> <code id="demo-points" title="Click to copy">https://services1.arcgis.com/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_3D_graduated/FeatureServer/0</code></p>
<p><strong>Lines:</strong> <code id="demo-lines" title="Click to copy">https://services1.arcgis.com/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_vertical/FeatureServer/1</code></p>
<p><strong>Polygons:</strong> <code id="demo-polygons" title="Click to copy">https://services1.arcgis.com/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_prism/FeatureServer/0</code></p>
<p><strong>3D Buildings:</strong> <code id="demo-buildings" title="Click to copy">https://tiles.arcgis.com/tiles/P3ePLMys2RVChkJx/arcgis/rest/services/Building_Rotterdam/SceneServer</code></p>
<p><strong>Elevation:</strong> <code id="demo-elevation" title="Click to copy">https://tiles.arcgis.com/tiles/AGrMjSBR7fxJYLfU/arcgis/rest/services/EU_3Dsurface_proj/ImageServer</code></p>

<hr>
<p style="color:grey"><b>Author:</b> Jakub Žejdlík (jakub.zejdlík@upol.cz)</p>
<p style="color:grey">Department of Geoinformatics, Palacký University Olomouc</p>
</div>
</div>

<script src="main.js"></script>
</body>
</html>

```

JavaScript

```

document.addEventListener("DOMContentLoaded", function () {
  require([
    "esri/Map",
    "esri/views/SceneView",
    "esri/layers/FeatureLayer",
    "esri/layers/SceneLayer",
    "esri/Ground",
    "esri/layers/ElevationLayer",
    "esri/widgets/Home",
    "esri/widgets/BasemapGallery",
    "esri/widgets/Expand",
    "esri/widgets/Legend",
    "esri/smartMapping/statistics/summaryStatistics",
    "esri/Viewpoint",
    "esri/core/reactiveUtils",
    "esri/geometry/geometryEngine"
  ], function (Map, SceneView, FeatureLayer, SceneLayer, Ground, ElevationLayer, Home, BasemapGallery, Expand, Legend, summaryStatistics, Viewpoint, reactiveUtils, geometryEngine) {

    function debounce(fn, d = 500) { let t; return (...a) => { clearTimeout(t); t = setTimeout(() => fn(...a), d); }; }

    const commonColorUI = `<h2>Color Ramp</h2><div class="color-pickers-wrapper"><input
type="color" id="startColorPicker" value="#4575b4"><input type="color" id="middleColorPicker"

```

```
value="#ffffbf"><input type="color" id="endColorPicker" value="#d73027"></div><div id="colorRampPreview"></div>`;
```

```
const visualizationMethods = {
  horizontal: {
    title: "Horizontal Planes",
    compatibleGeometry: ["polygon"],
    createUI: () => ` ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range" id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Height (Elevation)</h2><label for="planeHeightInput">Height Above Ground (m):</label><input type="number" id="planeHeightInput" value="300000" step="10000">`,
    createRenderer: (uiValues) => ({ type: "simple", symbol: { type: "polygon-3d", symbolLayers: [{ type: "fill", material: { color: "white", colorMixMode: "replace" } }] }, visualVariables: [{ type: "color", field: uiValues.field, stops: uiValues.colorStops } ] }, applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity; layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height }; }
  },
  point_cloud: {
    title: "Point Cloud",
    compatibleGeometry: ["point"],
    createUI: () => ` ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range" id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Point Size</h2><label for="sizeInput">Size (m):</label><input type="number" id="sizeInput" value="40000" min="0" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label for="minZOffsetInput">Min Z Offset (m):</label><input type="number" id="minZOffsetInput" value="0" step="1000"><br><label for="maxZOffsetInput">Max Z Offset (m):</label><input type="number" id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000"><h2>Shape</h2><select id="shapeSelect"><option value="sphere">Sphere</option><option value="cube">Cube</option><option value="diamond">Diamond</option></select>`,
    createRenderer: (uiValues) => ({ type: "simple", symbol: { type: "point-3d", symbolLayers: [{ type: "object", resource: { primitive: uiValues.shape }, width: uiValues.size, depth: uiValues.size, height: uiValues.size, material: { color: "white", colorMixMode: "replace" } } ] }, visualVariables: [{ type: "color", field: uiValues.field, stops: uiValues.colorStops } ] }, applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity; const { min, max } = uiValues.stats; layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", featureExpressionInfo: { expression: `var t = ($feature.${uiValues.field} - ${min}) / (${max} - ${min}); return ${uiValues.minZ} + t*(${uiValues.maxZ} - ${uiValues.minZ});` } } };
  },
  "3D_graduated_points": {
    title: "3D Graduated Symbols - Points",
    compatibleGeometry: ["point"],
    createUI: () => ` ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range" id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Point Size</h2><label for="minSizeInput">Min Size (m):</label><input type="number" id="minSizeInput" value="10000" step="1000"><br><label for="maxSizeInput">Max Size (m):</label><input type="number" id="maxSizeInput" value="100000" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label for="minZOffsetInput">Min Z Offset (m):</label><input type="number" id="minZOffsetInput" value="0" step="1000"><br><label for="maxZOffsetInput">Max Z Offset (m):</label><input type="number" id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000"><h2>Shape</h2><select id="shapeSelect"><option value="sphere">Sphere</option><option value="cube">Cube</option><option value="diamond">Diamond</option></select>`,
    createRenderer: (uiValues) => ({ type: "simple", symbol: { type: "point-3d", symbolLayers: [{ type: "object", resource: { primitive: uiValues.shape }, material: { color: "white", colorMixMode: "replace" }, depth: 1, width: 1, height: 1 } ] }
  },
}
```

```

        visualVariables: [
            { type: "color", field: uiValues.field, stops: uiValues.colorStops },
            {
                type: "size",
                field: uiValues.field,
                axis: "all",
                stops: [
                    { value: uiValues.stats.min, size: uiValues.minSize },
                    { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxSize }
                ]
            }
        ]
    }
    },
    applyProperties: (layer, uiValues) => {
        layer.opacity = uiValues.opacity;
        const { min, max } = uiValues.stats;
        layer.elevationInfo = {
            mode: "relative-to-ground",
            featureExpressionInfo: {
                expression: `var t = ($feature.${uiValues.field} - ${min}) / (${max} - ${min}); return ${uiValues.minZ} + t*(${uiValues.maxZ} - ${uiValues.minZ});`
            }
        };
    }
},
vertical: {
    title: "Vertical Planes",
    compatibleGeometry: ["polyline"],
    createUI: () => `
    ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range"
    id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Extrusion</h2><label
    for="minZOffsetInput">Base Height (m):</label><input type="number" id="minZOffsetInput"
    value="0" step="1000"><br><label for="maxZOffsetInput">Extrusion (m):</label><input
    type="number" id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label
    for="heightAboveGroundInput">Height Above Ground (m):</label><input type="number"
    id="heightAboveGroundInput" value="0" step="1000">`,
    createRenderer: (uiValues) => ({
        type: "simple",
        symbol: { type: "line-3d", symbolLayers: [{ type: "path", profile: "quad",
        material: { color: "white", colorMixMode: "replace" } } ] },
        visualVariables: [ { type: "color", field: uiValues.field, stops:
        uiValues.colorStops }, { type: "size", field: uiValues.field, axis: "height", stops: [{ value:
        uiValues.stats.min, size: uiValues.minZ }, { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxZ } ]
        }, { type: "size", axis: "width", value: 5000 } ]
    })),
    applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity;
    layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height }; }
},
"3D_graduated_columns": {
    title: "3D Graduated Symbols - Columns",
    compatibleGeometry: ["point"],
    createUI: () => `
    ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range"
    id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Diameter</h2><label
    for="diameterInput">Diameter (m):</label><input type="number" id="diameterInput" value="80000"
    step="1000"><h2>Extrusion</h2><label for="minZOffsetInput">Base Height (m):</label><input
    type="number" id="minZOffsetInput" value="0" step="1000"><br><label
    for="maxZOffsetInput">Extrusion (m):</label><input type="number" id="maxZOffsetInput"
    value="500000" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label
    for="heightAboveGroundInput">Height Above Ground (m):</label><input type="number"
    id="heightAboveGroundInput" value="0" step="1000"><h2>Shape</h2><select
    id="shapeSelect"><option value="cylinder">Cylinder</option><option
    value="cone">Cone</option><option value="inverted-cone">Inverted Cone</option><option
    value="tetrahedron">Tetrahedron</option></select>`,
    createRenderer: (uiValues) => ({
        type: "simple",

```

```

        symbol: { type: "point-3d", symbolLayers: [{ type: "object", resource: {
primitive: uiValues.shape }, width: uiValues.diameter, material: { color: "white", colorMixMode:
"replace" } } ] },
        visualVariables: [ { type: "color", field: uiValues.field, stops:
uiValues.colorStops }, { type: "size", field: uiValues.field, axis: "height", stops: [{ value:
uiValues.stats.min, size: uiValues.minZ }, { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxZ } ]
}, { type: "size", axis: "width-and-depth", useSymbolValue: true } ]
    )),
    applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity;
layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height }; }
},
    prism: {
        title: "Prism Map",
        compatibleGeometry: ["polygon"],
        createUI: () => ` ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range"
id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Extrusion</h2><label
for="minZOffsetInput">Base Height (m):</label><input type="number" id="minZOffsetInput"
value="0" step="1000"><br><label for="maxZOffsetInput">Extrusion (m):</label><input
type="number" id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label
for="heightAboveGroundInput">Height Above Ground (m):</label><input type="number"
id="heightAboveGroundInput" value="0" step="1000">`,
        createRenderer: (uiValues) => ({
            type: "simple",
            symbol: { type: "polygon-3d", symbolLayers: [{ type: "extrude", material: {
color: "white", colorMixMode: "replace" } } ] },
            visualVariables: [ { type: "color", field: uiValues.field, stops:
uiValues.colorStops }, { type: "size", field: uiValues.field, stops: [{ value:
uiValues.stats.min, size: uiValues.minZ }, { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxZ } ]
} ]
        )),
        applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity;
layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height }; }
    },
    voxels: {
        title: "Voxels",
        compatibleGeometry: ["polygon"],
        createUI: () => ` ${commonColorUI}<h2>Transparency</h2><input type="range"
id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1" step="0.01"><h2>Extrusion</h2><label
for="minZOffsetInput">Base Height (m):</label><input type="number" id="minZOffsetInput"
value="0" step="1000"><br><label for="maxZOffsetInput">Extrusion (m):</label><input
type="number" id="maxZOffsetInput" value="200000" step="1000"><h2>Height (Elevation)</h2><label
for="heightAboveGroundInput">Height Above Ground (m):</label><input type="number"
id="heightAboveGroundInput" value="0" step="1000">`,
        createRenderer: (uiValues) => ({
            type: "simple",
            symbol: { type: "polygon-3d", symbolLayers: [{ type: "extrude", material: {
color: "white", colorMixMode: "replace" } } ] },
            visualVariables: [ { type: "color", field: uiValues.field, stops:
uiValues.colorStops }, { type: "size", field: uiValues.field, stops: [{ value:
uiValues.stats.min, size: uiValues.minZ }, { value: uiValues.stats.max, size: uiValues.maxZ } ]
} ]
        )),
        applyProperties: (layer, uiValues) => { layer.opacity = uiValues.opacity;
layer.elevationInfo = { mode: "relative-to-ground", offset: uiValues.height }; }
    },
    building_context: {
        title: "3D Buildings",
        compatibleGeometry: ["mesh"],
        createUI: () => `
        <h2>Color</h2>
        <input type="color" id="singleColorPicker" value="#ffffff"
style="width:100%; height:40px; cursor:pointer;">
        <h2>Transparency</h2>
        <input type="range" id="transparencyInput" value="1" min="0" max="1"
step="0.01">
        <h2>Edges</h2>

```

```

        <div style="display:flex; align-items:center; gap:10px; margin-
bottom:10px;">
            <input type="checkbox" id="edgesCheckbox">
            <label for="edgesCheckbox" style="margin:0; cursor:pointer;">Show
Edges</label>
        </div>
        <label for="edgeColorPicker" style="font-size:12px;">Edge Color:</label>
        <input type="color" id="edgeColorPicker" value="#000000" style="width:100%;
height:30px; cursor:pointer;">
    },
    createRenderer: (uiValues) => ({
        type: "simple",
        symbol: {
            type: "mesh-3d",
            symbolLayers: [{
                type: "fill",
                material: { color: uiValues.singleColor, colorMixMode: "replace" },
                edges: uiValues.showEdges ? { type: "solid", color:
uiValues.edgeColor, size: 1 } : null
            }]
        }
    }),
    applyProperties: (layer, uiValues) => {
        layer.opacity = uiValues.opacity;
    }
}
};

function generatePopupTemplate(layer, title) {
    if (!layer.fields) return null;

    const allFieldInfos = layer.fields
        .filter(field => ![ "oid", "global-id", "geometry" ].includes(field.type))
        .map(field => ({ fieldName: field.name, label: field.alias || field.name }));

    return {
        title: title,
        content: [{ type: "fields", fieldInfos: allFieldInfos }]
    };
}

let activeLayers = [];
let focusedLayer = null;
let pendingLayer = null;

const defaultGround = new Ground({ layers: [new ElevationLayer({ url:
"//elevation3d.arcgis.com/arcgis/rest/services/WorldElevation3D/Terrain3D/ImageServer" })] });
const map = new Map({ basemap: "topo-vector", ground: defaultGround });

const homeViewpoint = new Viewpoint({
    camera: { position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 15000000 }, tilt: 0, heading:
-1 }
});

const view = new SceneView({
    container: "viewDiv",
    map: map,
    camera: { position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 25000000 }, tilt: 0, heading:
-1 },
    qualityProfile: "high"
});

view.ui.padding = { top: 65, bottom: 35 };
view.ui.add(new Home({ view: view, viewpoint: homeViewpoint }), "top-left");
view.ui.add(new Expand({ view, content: new BasemapGallery({ view }), expandIconClass:
"esri-icon-basemap" }), "top-left");

```

```

    view.ui.add(new Expand({ view: view, content: new Legend({ view }), expandIconClass:
"esri-icon-legend" })), "bottom-left");

    const addLayerPanel = document.getElementById("addLayerPanel");
    const methodSelectionPanel = document.getElementById("methodSelectionPanel");
    const symbologyEditorPanel = document.getElementById("symbologyEditorPanel");
    const layerListUl = document.getElementById("layer-list");
    const layerUrlInput = document.getElementById("layerUrlInput");
    const loadLayerBtn = document.getElementById("loadLayerBtn");
    const loadingMessage = document.getElementById("loadingMessage");
    const methodButtonsContainer = document.getElementById("method-buttons-container");
    const cancelMethodBtn = document.getElementById("cancelMethodBtn");
    const symbologyControlsContainer = document.getElementById("symbology-controls-
container");
    const symbologyPanelTitle = document.getElementById("symbologyPanelTitle");
    const addThematicLayerBtn = document.getElementById("addThematicLayerBtn");

    const changeElevationBtn = document.getElementById("changeElevationBtn");
    const elevationPanel = document.getElementById("elevationPanel");
    const defaultElevationRadio = document.getElementById("defaultElevationRadio");
    const customElevationRadio = document.getElementById("customElevationRadio");
    const elevationUrlInput = document.getElementById("elevationUrlInput");
    const applyElevationBtn = document.getElementById("applyElevationBtn");
    const elevationLoadingMessage = document.getElementById("elevationLoadingMessage");

    const addBuildingsBtn = document.getElementById("addBuildingsBtn");
    const addBuildingsPanel = document.getElementById("addBuildingsPanel");
    const buildingsUrlInput = document.getElementById("buildingsUrlInput");
    const loadBuildingsBtn = document.getElementById("loadBuildingsBtn");
    const buildingsLoadingMessage = document.getElementById("buildingsLoadingMessage");

    const shareLinkBtn = document.getElementById("shareLinkBtn");

    function calculateSmartDefaults(extent, methodKey) {
        if (!extent) return null;

        const w = extent.width;
        const h = extent.height;
        const scale = Math.max(w, h);

        let calculatedHeight = Math.round(scale * 0.05);

        const groundedMethods = ["vertical", "3D_graduated_columns", "prism", "voxels"];
        if (groundedMethods.includes(methodKey)) {
            calculatedHeight = 0;
        }

        return {
            height: calculatedHeight,
            size: Math.round(scale * 0.025),
            minSize: Math.round(scale * 0.02),
            maxSize: Math.round(scale * 0.05),
            minZ: Math.round(scale * 0.005),
            maxZ: Math.round(scale * 0.2),
            diameter: Math.round(scale * 0.02)
        };
    }

    function updateShareUrl() {
        let currentElevationUrl = null;
        if (customElevationRadio.checked && map.ground.layers.length > 0) {
            currentElevationUrl = map.ground.layers.getItemAt(0).url;
        }

        const state = {
            layers: activeLayers.map(l => ({

```

```

        url: l.originalInputUrl || l.url,
        title: l.title,
        methodKey: l.methodKey,
        symbology: l.currentSymbology,
        visible: l.visible,
        isContext: !!l.isContextLayer
    })),
    camera: view.camera.toJSON(),
    elevation: currentElevationUrl
};

const encodedState = btoa(unescape(encodeURIComponent(JSON.stringify(state))));
const newUrl = new URL(window.location);
newUrl.searchParams.set('state', encodedState);
window.history.replaceState({}, '', newUrl);
}

async function loadStateFromUrl() {
    const params = new URLSearchParams(window.location.search);
    const stateParam = params.get('state');
    if (!stateParam) return false;

    try {
        const decodedState = JSON.parse(decodeURIComponent(escape(atob(stateParam))));

        if (decodedState.camera) {
            view.camera = decodedState.camera;
        }

        if (decodedState.elevation) {
            const newElevationLayer = new ElevationLayer({ url: decodedState.elevation

            await newElevationLayer.load();
            map.ground = new Ground({ layers: [newElevationLayer] });
            customElevationRadio.checked = true;
            elevationUrlInput.value = decodedState.elevation;
            elevationUrlInput.disabled = false;
        }

        if (decodedState.layers && Array.isArray(decodedState.layers)) {
            for (const lData of decodedState.layers) {
                let layer;
                if (lData.isContext) {
                    layer = new SceneLayer({ url: lData.url });
                } else {
                    layer = new FeatureLayer({ url: lData.url, outFields: ["*"] });
                }

                layer.title = lData.title;
                layer.originalInputUrl = lData.url;

                try {
                    await layer.load();

                    layer.methodKey = lData.methodKey;
                    layer.currentSymbology = lData.symbology;
                    layer.visible = lData.visible;
                    if (lData.isContext) {
                        layer.isContextLayer = true;
                    } else {
                        const config = visualizationMethods[lData.methodKey];
                        layer.popupTemplate = generatePopupTemplate(layer, config ?
config.title : layer.title);
                    }

                    map.add(layer);

```

```

        activeLayers.push(layer);

        applySymbology(layer);
    } catch (err) {
        console.error("Failed to restore layer:", lData.title, err);
    }
}
updateLayerList();
}
return true;

} catch (e) {
    console.error("Chyba při načítání sdíleného odkazu:", e);
    return false;
}
}

if (shareLinkBtn) {
    shareLinkBtn.addEventListener("click", () => {
        navigator.clipboard.writeText(window.location.href);
        alert("Link copied to clipboard!");
    });
}

view.watch("camera", debounce(() => updateShareUrl(), 1000));

async function handleLoadLayer() {
    const url = layerUrlInput.value;
    if (!url) { alert("Please enter a Feature Layer URL."); return; }
    loadingMessage.style.display = "block";
    loadLayerBtn.disabled = true;
    pendingLayer = null;
    try {
        pendingLayer = new FeatureLayer({ url: url, outFields: ["*"] });
        layer.originalInputUrl = url;
        await pendingLayer.load();
        if (!pendingLayer.title) pendingLayer.title = "New Layer";
        showMethodSelection(pendingLayer.geometryType);
    } catch (error) {
        console.error("Failed to load layer:", error);
        alert("Could not load layer.");
        pendingLayer = null;
    } finally {
        loadingMessage.style.display = "none";
        loadLayerBtn.disabled = false;
    }
}

function showMethodSelection(geometryType) {
    methodButtonsContainer.innerHTML = "";
    const compatibleMethods = Object.keys(visualizationMethods).filter(key =>
visualizationMethods[key].compatibleGeometry.includes(geometryType));
    if (compatibleMethods.length === 0) {
        alert(`No compatible visualization methods found for (${geometryType}).`);
        pendingLayer = null; return;
    }
    compatibleMethods.forEach(key => {
        const btn = document.createElement("button");
        btn.className = "method-btn";
        btn.innerText = visualizationMethods[key].title;
        btn.onclick = () => finalizeAddLayer(key);
        methodButtonsContainer.appendChild(btn);
    });
    addLayerPanel.style.display = "none";
    methodSelectionPanel.style.display = "block";
}
}

```

```

async function finalizeAddLayer(methodKey) {
  if (!pendingLayer) return;
  const layer = pendingLayer;
  pendingLayer = null;
  const config = visualizationMethods[methodKey];

  layer.popupTemplate = generatePopupTemplate(layer, config.title);
  layer.methodKey = methodKey;

  map.add(layer);
  activeLayers.push(layer);

  const numericFields = layer.fields.filter(f => ["double", "integer", "single",
"small-integer"].includes(f.type)).map(f => f.name);
  const defaultField = numericFields.length > 0 ? numericFields[0] : null;

  let trueExtent = layer.fullExtent;
  try {
    const extentResult = await layer.queryExtent();
    if (extentResult && extentResult.count > 0) {
      trueExtent = extentResult.extent;
      console.log("Using queried extent for smart defaults:", trueExtent);
    }
  } catch (e) {
    console.warn("Query extent failed, falling back to metadata fullExtent:", e);
  }

  const smartDefaults = calculateSmartDefaults(trueExtent, methodKey);

  const applyDefaultsToUI = (container, defaults) => {
    if (!defaults) return;
    const setVal = (id, val) => {
      const el = container.querySelector('#' + id);
      if (el) el.value = val;
    };
    setVal("planeHeightInput", defaults.height);
    setVal("heightAboveGroundInput", defaults.height);
    setVal("sizeInput", defaults.size);
    setVal("minSizeInput", defaults.minSize);
    setVal("maxSizeInput", defaults.maxSize);
    setVal("minZOffsetInput", defaults.minZ);
    setVal("maxZOffsetInput", defaults.maxZ);
    setVal("diameterInput", defaults.diameter);
  };

  if (defaultField) {
    const stats = await summaryStatistics({ layer, field: defaultField });
    const tempDiv = document.createElement('div');
    tempDiv.innerHTML = config.createUI();

    applyDefaultsToUI(tempDiv, smartDefaults);

    layer.currentSymbolology = getUIValues(tempDiv, defaultField, stats);
    layer.currentSymbolology.labelField = "__none__";
    applySymbolology(layer);
  } else {
    const tempDiv = document.createElement('div');
    tempDiv.innerHTML = config.createUI();

    applyDefaultsToUI(tempDiv, smartDefaults);

    layer.currentSymbolology = getUIValues(tempDiv, null, {min: 0, max: 0, avg: 0});
    layer.currentSymbolology.labelField = "__none__";
  }
}

```

```

    try {
        await view.whenLayerView(layer);
        view.goTo(trueExtent, { duration: 1500 });
    } catch (e) { console.error(e); }

    openSymbologyEditor(layer);
    updateLayerList();
    methodSelectionPanel.style.display = "none";
    updateShareUrl();
}

function cancelMethodSelection() {
    pendingLayer = null;
    methodSelectionPanel.style.display = "none";
    addLayerPanel.style.display = "block";
}

async function handleLoadBuildings() {
    const url = buildingsUrlInput.value;
    if (!url) { alert("Please enter a Scene Layer URL."); return; }
    buildingsLoadingMessage.style.display = "block";
    loadBuildingsBtn.disabled = true;

    try {
        const layer = new SceneLayer({ url: url });
        layer.originalInputUrl = url;
        await layer.load();
        if (!layer.title) layer.title = "3D Buildings";
        layer.isContextLayer = true;
        layer.methodKey = "building_context";
        layer.currentSymbology = {
            field: null, labelField: "__none__", stats: { min: 0, max: 0, avg: 0 },
            singleColor: "#ffffff", opacity: 1, showEdges: false, edgeColor: "#000000"
        };

        map.add(layer);
        activeLayers.push(layer);
        applySymbology(layer);

        try {
            await view.whenLayerView(layer);
            view.goTo(layer.fullExtent, { duration: 1500 });
        } catch (e) { console.error(e); }

        openSymbologyEditor(layer);
        updateLayerList();
        addBuildingsPanel.style.display = "none";
        buildingsUrlInput.value = "";
        updateShareUrl();

    } catch (error) {
        console.error("Failed to load buildings:", error);
        alert("Could not load buildings.");
    } finally {
        buildingsLoadingMessage.style.display = "none";
        loadBuildingsBtn.disabled = false;
    }
}

function removeLayer(layerId) {
    const layerToRemove = activeLayers.find(l => l.id === layerId);
    if (!layerToRemove) return;
    map.remove(layerToRemove);
    activeLayers = activeLayers.filter(l => l.id !== layerId);
    if (focusedLayer && focusedLayer.id === layerId) closeSymbologyEditor();
    updateLayerList();
}

```

```

        updateShareUrl();
    }

    async function openSymbologyEditor(layer) {
        focusedLayer = layer;
        if (!layer) { closeSymbologyEditor(); return; }

        const config = visualizationMethods[layer.methodKey];
        symbologyPanelTitle.innerText = `Symbology (${config.title})`;
        let renameHTML = `

## Layer Name</h2><input type="text" id="layerNameInput">`; if (layer.isContextLayer) { symbologyControlsContainer.innerHTML = renameHTML + config.createUI(); } else { const numericFields = layer.fields.filter(f => ["double", "integer", "single", "small-integer"].includes(f.type)); let attributeSelectorHTML = `Attribute to Visualize</h2>`; if (numericFields.length > 0) { attributeSelectorHTML += `Labels</h2><select id="labelAttributeSelect"><option value="__none__">-- No Labels --</option>`; allFields.forEach(field => labelingSelectorHTML += `


```

```

function updateLayerList() {
    if (activeLayers.length === 0) {
        layerListUl.innerHTML = `
```

```

        setInputValue("shapeSelect", values.shape);
        setInputValue("diameterInput", values.diameter);
        setInputValue("heightAboveGroundInput", values.height);
        setInputValue("singleColorPicker", values.singleColor);
        setInputValue("edgesCheckbox", values.showEdges);
        setInputValue("edgeColorPicker", values.edgeColor);
    }

    function getUIValues(sourceElement = symbologyControlsContainer, field = null, stats =
null) {
        const getValue = (id, isFloat = false, defaultValue = null) => {
            const input = sourceElement.querySelector(`#${id}`); if (!input) return
defaultValue;
            const val = isFloat ? parseFloat(input.value) : parseInt(input.value);
            return isNaN(val) ? defaultValue : val;
        };
        const getString = (id, defaultValue = null) => {
            const el = sourceElement.querySelector(`#${id}`); return el ? el.value :
defaultValue;
        };
        const getBool = (id, defaultValue = false) => {
            const el = sourceElement.querySelector(`#${id}`); return el ? el.checked :
defaultValue;
        };

        const startColor = getString("startColorPicker", "#4575b4");
        const middleColor = getString("middleColorPicker", "#ffffbf");
        const endColor = getString("endColorPicker", "#d73027");

        const finalStats = stats || focusedLayer?.currentSymbology.stats || { min: 0, max:
0, avg: 0 };
        const attributeSelect = sourceElement.querySelector("#attributeSelect");

        return {
            field: field || (attributeSelect ? attributeSelect.value : null),
            labelField: getString("labelAttributeSelect", "__none__"),
            stats: finalStats,
            rawColors: { start: startColor, middle: middleColor, end: endColor },
            colorStops: [ { value: finalStats.min, color: startColor }, { value:
finalStats.avg, color: middleColor }, { value: finalStats.max, color: endColor } ],
            opacity: getValue("transparencyInput", true, 1),
            height: getValue("heightAboveGroundInput") ?? getValue("planeHeightInput") ??
0,

            minZ: getValue("minZOffsetInput") ?? 0,
            maxZ: getValue("maxZOffsetInput") ?? 0,
            size: getValue("sizeInput"),
            minSize: getValue("minSizeInput"),
            maxSize: getValue("maxSizeInput"),
            diameter: getValue("diameterInput"),
            shape: getString("shapeSelect"),
            singleColor: getString("singleColorPicker", "#ffffff"),
            showEdges: getBool("edgesCheckbox", false),
            edgeColor: getString("edgeColorPicker", "#000000")
        };
    }

    async function updateStatsAndSymbology() {
        if (!focusedLayer) return;
        const attributeSelect = document.getElementById("attributeSelect");
        if (!attributeSelect) { handleInputChange(); return; }

        const selectedField = attributeSelect.value;
        const stats = await summaryStatistics({ layer: focusedLayer, field: selectedField
});

        focusedLayer.currentSymbology.field = selectedField;
        focusedLayer.currentSymbology.stats = stats;
    }

```

```

const labelField = document.getElementById("labelAttributeSelect")?.value;
if (labelField) focusedLayer.currentSymbology.labelField = labelField;

updateUIFromValues(focusedLayer.currentSymbology);
handleInputChange();
}

function applySymbology(layerToApply = focusedLayer) {
  if (!layerToApply) return;
  const config = visualizationMethods[layerToApply.methodKey];
  const uiValues = (focusedLayer && layerToApply.id === focusedLayer.id &&
symbologyEditorPanel.style.display === "block")
    ? getUIValues() : layerToApply.currentSymbology;
  if (!uiValues) return;

  if (focusedLayer && layerToApply.id === focusedLayer.id)
layerToApply.currentSymbology = uiValues;
  if (config.createRenderer) layerToApply.renderer = config.createRenderer(uiValues);
  if (config.applyProperties) config.applyProperties(layerToApply, uiValues);

  if (!layerToApply.isContextLayer) {
    if (uiValues.labelField && uiValues.labelField !== "__none__") {
      const field = layerToApply.fields.find(f => f.name === uiValues.labelField);
      const fieldType = field ? field.type : "string";
      let labelExpression = ["double", "integer", "single", "small-
integer"].includes(fieldType) ? `Text($feature.${uiValues.labelField}, '#,###')` :
`$feature.${uiValues.labelField}`;
      layerToApply.labelingInfo = [{
        labelExpressionInfo: { expression: labelExpression },
        symbol: { type: "label-3d", symbolLayers: [{ type: "text", material: {
color: "#E0E0E0" }, halo: { color: [0, 0, 0, 0.7], size: 1 }, font: { size: 10, family: "Open
Sans" } } ] } }
      ]};
    } else {
      layerToApply.labelingInfo = null;
    }
  }
  updateShareUrl();
}

function handleLayerNameChange() {
  if (!focusedLayer) return;
  const nameInput = document.getElementById("layerNameInput");
  if (nameInput) {
    focusedLayer.title = nameInput.value || "Untitled Layer";
    updateLayerList(); updateShareUrl();
  }
}

function handleInputChange() {
  updatePreviewFromInputs();
  applySymbology();
}

function updatePreviewFromInputs() {
  const colorRampPreview = document.getElementById("colorRampPreview");
  if (!colorRampPreview) return;
  const uiValues = getUIValues(symbologyControlsContainer);
  if (!uiValues || !uiValues.colorStops) return;
  const colors = uiValues.colorStops.map(stop => stop.color);
  colorRampPreview.style.background = `linear-gradient(to right, ${colors.join(",
")})`;
}

const debouncedInputChangeHandler = debounce(handleInputChange, 50);
const debouncedNameChangeHandler = debounce(handleLayerNameChange, 250);

```

```

function addEventListenersToControls() {
    const layerNameInput = document.getElementById("layerNameInput");
    if (layerNameInput) layerNameInput.addEventListener("input",
debouncedNameChangeHandler);

    document.querySelectorAll("#symbology-controls-container
input:not(#layerNameInput)').forEach(input => {
        input.addEventListener("input", debouncedInputChangeHandler);
    });
    document.querySelectorAll("#symbology-controls-container
select:not(#attributeSelect):not(#labelAttributeSelect)').forEach(select => {
        select.addEventListener("change", handleInputChange);
    });
    const attributeSelect = document.getElementById("attributeSelect");
    if (attributeSelect) attributeSelect.addEventListener("change",
updateStatsAndSymbology);
    const labelAttributeSelect = document.getElementById("labelAttributeSelect");
    if (labelAttributeSelect) labelAttributeSelect.addEventListener("change",
handleInputChange);
}

loadLayerBtn.addEventListener("click", handleLoadLayer);
cancelMethodBtn.addEventListener("click", cancelMethodSelection);
document.getElementById("closeSymbologyBtn").addEventListener("click",
closeSymbologyEditor);
loadBuildingsBtn.addEventListener("click", handleLoadBuildings);
layerListUl.addEventListener("click", (event) => {
    const button = event.target.closest("button");
    if (!button) return;
    const layerId = button.dataset.layerId;
    const layer = activeLayers.find(l => l.id === layerId);
    if (!layer) return;

    if (button.classList.contains("remove-layer-btn")) removeLayer(layerId);
    else if (button.classList.contains("edit-symbology-btn"))
openSymbologyEditor(layer);
    else if (button.classList.contains("toggle-visibility-btn")) {
        layer.visible = !layer.visible;
        updateLayerList(); updateShareUrl();
    }
});

function hideAllRightPanels() {
    addLayerPanel.style.display = "none";
    methodSelectionPanel.style.display = "none";
    symbologyEditorPanel.style.display = "none";
    elevationPanel.style.display = "none";
    addBuildingsPanel.style.display = "none";
}

addThematicLayerBtn.addEventListener("click", () => {
    const isVisible = addLayerPanel.style.display === "block";
    hideAllRightPanels(); if (!isVisible) addLayerPanel.style.display = "block";
});
addBuildingsBtn.addEventListener("click", () => {
    const isVisible = addBuildingsPanel.style.display === "block";
    hideAllRightPanels(); if (!isVisible) addBuildingsPanel.style.display = "block";
});
changeElevationBtn.addEventListener("click", () => {
    const isVisible = elevationPanel.style.display === "block";
    hideAllRightPanels(); if (!isVisible) elevationPanel.style.display = "block";
});

defaultElevationRadio.addEventListener("change", () => {
    if (defaultElevationRadio.checked) elevationUrlInput.disabled = true;

```

```

    });
    customElevationRadio.addEventListener("change", () => {
        if (customElevationRadio.checked) elevationUrlInput.disabled = false;
    });

    applyElevationBtn.addEventListener("click", async () => {
        elevationLoadingMessage.style.display = "block";
        applyElevationBtn.disabled = true;
        try {
            if (defaultElevationRadio.checked) {
                map.ground = defaultGround;
            } else if (customElevationRadio.checked) {
                const url = elevationUrlInput.value;
                if (!url) { alert("Please enter an Elevation Layer URL."); return; }
                const newElevationLayer = new ElevationLayer({ url: url });
                await newElevationLayer.load();
                map.ground = new Ground({ layers: [newElevationLayer] });
            }
            updateShareUrl();
        } catch (error) {
            console.error("Failed to apply elevation:", error);
            alert("Could not load elevation layer.");
            map.ground = defaultGround;
        } finally {
            elevationLoadingMessage.style.display = "none";
            applyElevationBtn.disabled = false;
        }
    });

    document.getElementById("home-link").addEventListener("click", (e) => {
        e.preventDefault();
        const cleanUrl = window.location.origin + window.location.pathname;
        window.location.href = cleanUrl;
    });

    const helpButton = document.getElementById("helpButton");
    const helpOverlay = document.getElementById("helpModalOverlay");
    const closeHelpModalBtn = document.getElementById("closeHelpModal");

    const closeHelp = () => { if (helpOverlay) helpOverlay.style.display = "none"; };
    const openHelp = () => { if (helpOverlay) helpOverlay.style.display = "flex"; };
    function copyToClipboard(text, element) {
        navigator.clipboard.writeText(text).then(() => {
            const originalText = element.innerText;
            element.innerText = "Copied!";
            element.style.color = "#FFD54F";
            setTimeout(() => { element.innerText = originalText; element.style.color =
"#f0f0f0"; }, 1500);
        }).catch(err => { console.error('Failed to copy text: ', err); });
    }

    helpButton.addEventListener("click", () => {
        openHelp();
        const demoPoints = document.getElementById("demo-points");
        if (demoPoints) demoPoints.onclick = (e) => copyToClipboard(e.target.innerText,
e.target);
        const demoLines = document.getElementById("demo-lines");
        if (demoLines) demoLines.onclick = (e) => copyToClipboard(e.target.innerText,
e.target);
        const demoPolygons = document.getElementById("demo-polygons");
        if (demoPolygons) demoPolygons.onclick = (e) => copyToClipboard(e.target.innerText,
e.target);
        const demoBuildings = document.getElementById("demo-buildings");
        if (demoBuildings) demoBuildings.onclick = (e) =>
copyToClipboard(e.target.innerText, e.target);
        const demoElevation = document.getElementById("demo-elevation");

```

```

        if (demoElevation) demoElevation.onclick = (e) =>
copyToClipboard(e.target.innerText, e.target);
    });

    closeHelpModalBtn.addEventListener("click", closeHelp);
    helpOverlay.addEventListener("click", (e) => { if (e.target === helpOverlay)
closeHelp(); });

    window.addEventListener("keydown", (e) => {
        if (e.key === "Escape") { closeHelp(); hideAllRightPanels(); }
    });

    const feedbackBtn = document.getElementById("feedbackBtn");
    if (feedbackBtn) {
        feedbackBtn.addEventListener("click", () => {
            const email = "jakub.zejdlik@upol.cz";
            const subject = encodeURIComponent("Feedback: 3D-Geo-Vis 2.0");
            const body = encodeURIComponent("Hello Jakub,\n\nHere is my feedback on 3D-Geo-
Vis 2.0:\n\n");

            window.location.href = `mailto:${email}?subject=${subject}&body=${body}`;
        });
    }

    document.addEventListener("click", function(event) {
        const rightPanels = [addLayerPanel, methodSelectionPanel, symbologyEditorPanel,
elevationPanel, addBuildingsPanel];
        if (rightPanels.some(p => p.style.display === "block" && p.contains(event.target)))
return;

        const triggerButtons = [addThematicLayerBtn, addBuildingsBtn, changeElevationBtn];
        if (triggerButtons.some(b => b.contains(event.target))) return;
        if (event.target.closest(".edit-symbology-btn")) return;
        hideAllRightPanels();
    });

    view.when(async () => {
        updateLayerList();

        const restoredState = await loadStateFromUrl();

        if (!restoredState) {
            try {
                await view.goTo({ position: { latitude: 48, longitude: 15, z: 15000000 },
tilt: 0, heading: -1 }, { duration: 5000 });
            } catch (e) {}
        }
    });
});
});

```

CSS

```

:root {
    --header-h: 50px;
    --bg-color: #1a1a1a;
    --panel-bg: rgba(40, 40, 40, 0.85);
    --header-bg: #1e1e1e;
    --text-color: #e0e0e0;
    --text-muted: #9e9e9e;
    --accent-color: #007ac2;
    --border-color: rgba(255, 255, 255, 0.1);
    --panel-shadow: 0 8px 32px 0 rgba(0, 0, 0, 0.37);
    --backdrop-blur: 10px;
}

*, *:before, *:after {

```

```

    box-sizing: border-box;
}

html, body {
    margin: 0;
    padding: 0;
    height: 100%;
    width: 100%;
    font-family: 'Open Sans', sans-serif;
    background-color: var(--bg-color);
    color: var(--text-color);
    overflow: hidden;
}

#viewDiv {
    position: absolute;
    top: 0;
    left: 0;
    right: 0;
    bottom: 0;
    padding: 0;
    margin: 0;
}

#headerBar {
    position: absolute;
    top: 0;
    left: 0;
    right: 0;
    height: var(--header-h);
    background-color: var(--header-bg);
    color: var(--text-color);
    padding: 0 20px;
    z-index: 100;
    box-shadow: 0 4px 12px rgba(0,0,0,0.3);
    display: flex;
    align-items: center;
    justify-content: space-between;
    border-bottom: 1px solid var(--border-color);
}

.header-right-controls {
    display: flex;
    align-items: center;
    gap: 15px;
}

.header-app-title {
    font-size: 20px;
    font-weight: bold;
    text-decoration: none;
    color: var(--text-color);
}

.header-button {
    font-size: 25px;
    color: var(--text-muted);
    background: none;
    border: none;
    cursor: pointer;
    transition: color 0.2s ease-in-out;
}

.header-button:hover {
    color: white;
}

```

```

.header-separator {
    width: 1px;
    height: 24px;
    background-color: #9e9e9e;
    margin: 0 2px;
    opacity: 0.7;
}

.panel {
    background: var(--panel-bg);
    backdrop-filter: blur(var(--backdrop-blur));
    -webkit-backdrop-filter: blur(var(--backdrop-blur));
    padding: 20px;
    border: 1px solid var(--border-color);
    border-radius: 12px;
    box-shadow: var(--panel-shadow);
    z-index: 50;
    transition: opacity 0.3s, transform 0.3s;
}

#addLayerPanel,          #symbologyEditorPanel,          #methodSelectionPanel,          #elevationPanel,
#addBuildingsPanel {
    position: absolute;
    top: calc(var(--header-h) + 15px);
    right: 15px;
    width: 320px;
    max-height: calc(100vh - var(--header-h) - 35px - 33vh - 30px);
    overflow-y: auto;
}

#addLayerPanel {
    display: none;
}

#layerListPanel {
    position: absolute;
    bottom: 35px;
    right: 15px;
    width: 320px;
    max-height: 33vh;
    overflow-y: auto;
}

.panel h3 {
    font-size: 20px;
    margin: 0 0 15px 0;
    color: white;
    padding-bottom: 15px;
    border-bottom: 1px solid var(--border-color);
    text-align: center;
}

.panel h2 {
    font-size: 14px;
    font-weight: bold;
    text-transform: uppercase;
    color: var(--text-muted);
    margin-top: 20px;
    margin-bottom: 10px;
}

.panel label {
    font-size: 14px;
    color: var(--text-muted);
    margin-bottom: 5px;
    display: block;
}

```

```

}

.panel input[type="text"],
.panel input[type="number"],
.panel select {
  width: 100%;
  padding: 8px 12px;
  border: 1px solid var(--border-color);
  border-radius: 6px;
  font-size: 14px;
  margin-bottom: 0px;
  background-color: rgba(0,0,0,0.2);
  color: var(--text-color);
}

.panel select option {
  background-color: var(--header-bg);
  color: var(--text-color);
}

.panel input[type="color"] {
  -webkit-appearance: none; -moz-appearance: none; appearance: none;
  background-color: transparent;
  width: 100%; height: 35px; flex-grow: 1;
  border: none; outline: none; cursor: pointer;
  padding: 0; border-radius: 6px;
  transition: transform 0.2s ease-in-out;
}
.panel input[type="color"]::-webkit-color-swatch-wrapper { padding: 0; }
.panel input[type="color"]::-webkit-color-swatch { border: none; border-radius: 6px; }
.panel input[type="color"]:hover { transform: scale(1.05); }

.color-pickers-wrapper { display: flex; gap: 10px; }

#loadLayerBtn, #closeSymbologyBtn {
  width: 100%; padding: 10px; background-color: var(--accent-color);
  color: white; border: none; border-radius: 6px;
  font-size: 16px; font-weight: bold; cursor: pointer;
  transition: background-color 0.2s; margin-top: 10px;
}
#loadLayerBtn:hover, #closeSymbologyBtn:hover { background-color: #0099f7; }
#loadLayerBtn:disabled { background-color: var(--text-muted); cursor: not-allowed; }

#colorRampPreview { width: 100%; height: 15px; border-radius: 4px; margin-top: 10px; }
hr { border: 0; border-top: 1px solid var(--border-color); margin: 20px 0; }
.placeholder-text { color: var(--text-muted); text-align: center; margin: 10px 0; font-style: italic; }

#layer-list { list-style: none; padding: 0; margin: 0; }
#layer-list li {
  display: flex;
  justify-content: space-between;
  align-items: center;
  padding: 10px 5px;
  border-bottom: 1px solid var(--border-color);
  font-size: 14px;
  gap: 10px;
}
#layer-list li:last-child { border-bottom: none; }

#layer-list li > span {
  flex-grow: 1;
  min-width: 0;
  overflow: hidden;
  text-overflow: ellipsis;
}

```

```

    white-space: nowrap;
}

.layer-controls {
    flex-shrink: 0;
    display: flex;
}

.layer-controls button {
    background: none; border: none;
    color: var(--text-muted); font-size: 16px;
    cursor: pointer; transition: color 0.2s; padding: 5px;
}

.layer-controls button:hover { color: white; }
.remove-layer-btn:hover { color: #ff5555; }

.esri-widget {
    background: var(--panel-bg) !important;
    backdrop-filter: blur(var(--backdrop-blur)) !important;
    -webkit-backdrop-filter: blur(var(--backdrop-blur)) !important;
    color: var(--text-color) !important;
    border: 1px solid var(--border-color) !important;
    box-shadow: var(--panel-shadow) !important;
}

.esri-legend__service-label, .esri-basemap-gallery__item-title {
    color: var(--text-color) !important;
}

.esri-widget--button:hover {
    background-color: rgba(255,255,255,0.1) !important;
}

.esri-zoom .esri-widget--button {
    border-bottom: 1px solid var(--border-color) !important;
}

.modal-overlay { display: none; position: fixed; top: 0; left: 0; width: 100%; height: 100%;
background-color: rgba(0, 0, 0, 0.7); z-index: 1000; justify-content: center; align-items:
center; }

.help-modal {
    background-color: var(--header-bg);
    padding: 30px;
    border-radius: 8px;
    box-shadow: 0 5px 15px rgba(0, 0, 0, 0.5);
    max-width: 700px;
    position: relative;
    border: 1px solid var(--border-color);
    max-height: 80vh;
    overflow-y: auto;
}

.help-modal h3 { color: white; }
.close-button { color: var(--text-muted); font-size: 28px; font-weight: bold; background: none;
border: none; position: absolute; top: 10px; right: 15px; cursor: pointer;}
.close-button:hover { color: white; }

input[type="range"] {
    -webkit-appearance: none !important;
    appearance: none !important;
    width: 100% !important;
    height: 8px !important;
    background: rgba(0, 0, 0, 0.3) !important;
    border-radius: 5px !important;
    outline: none !important;
    margin-bottom: 15px;
}

input[type="range"]::-webkit-slider-thumb {

```

```

-webkit-appearance: none !important;
appearance: none !important;
width: 20px !important;
height: 20px !important;
background: var(--accent-color) !important;
cursor: pointer !important;
border-radius: 50% !important;
border: 2px solid white !important;
box-shadow: 0 0 5px rgba(0, 122, 194, 0.5) !important;
}

input[type="range"]::-moz-range-thumb {
  width: 20px !important;
  height: 20px !important;
  background: var(--accent-color) !important;
  cursor: pointer !important;
  border-radius: 50% !important;
  border: 2px solid white !important;
  box-shadow: 0 0 5px rgba(0, 122, 194, 0.5) !important;
}

.panel::-webkit-scrollbar,
#symbology-controls-container::-webkit-scrollbar,
.help-modal::-webkit-scrollbar {
  width: 8px;
}
.panel::-webkit-scrollbar-track,
#symbology-controls-container::-webkit-scrollbar-track,
.help-modal::-webkit-scrollbar-track {
  background: transparent;
}
.panel::-webkit-scrollbar-thumb,
#symbology-controls-container::-webkit-scrollbar-thumb,
.help-modal::-webkit-scrollbar-thumb {
  background-color: var(--text-muted);
  border-radius: 10px;
  border: 2px solid transparent;
  background-clip: content-box;
}
.panel::-webkit-scrollbar-thumb:hover,
#symbology-controls-container::-webkit-scrollbar-thumb:hover,
.help-modal::-webkit-scrollbar-thumb:hover {
  background-color: var(--accent-color);
}

#method-buttons-container {
  display: grid;
  grid-template-columns: 1fr;
  gap: 10px;
  margin-bottom: 20px;
}

.method-btn {
  width: 100%;
  padding: 10px;
  background-color: rgba(255, 255, 255, 0.05);
  color: var(--text-color);
  border: 1px solid var(--border-color);
  border-radius: 6px;
  font-size: 14px;
  cursor: pointer;
  transition: background-color 0.2s, border-color 0.2s;
  text-align: left;
}

.method-btn:hover {

```

```

        background-color: rgba(255, 255, 255, 0.1);
        border-color: var(--accent-color);
    }

    .secondary-btn {
        width: 100%;
        padding: 10px;
        background-color: rgba(255, 255, 255, 0.1);
        color: var(--text-muted);
        border: none;
        border-radius: 6px;
        font-size: 16px;
        cursor: pointer;
        transition: background-color 0.2s;
    }

    .secondary-btn:hover {
        background-color: rgba(255, 255, 255, 0.2);
    }

    .method-name {
        color: #FFD54F;
        font-size: 0.9em;
        font-style: italic;
    }

    .help-modal code {
        background-color: rgba(0, 0, 0, 0.3);
        padding: 2px 5px;
        border-radius: 4px;
        font-family: 'Courier New', Courier, monospace;
        font-size: 0.9em;
        color: #f0f0f0;
        word-break: break-all;
        cursor: pointer;
        transition: background-color 0.2s;
    }

    .help-modal code:hover {
        background-color: rgba(80, 80, 80, 0.5);
    }

    #elevationPanel {
        display: none;
    }

    .elevation-option {
        display: flex;
        align-items: center;
        margin-bottom: 10px;
    }

    .elevation-option input[type="radio"] {
        margin-right: 10px;
        width: auto;
    }

    .elevation-option label {
        margin-bottom: 0;
        font-size: 15px;
        color: var(--text-color);
    }

    #elevationUrlInput {
        margin-top: 5px;
    }

```

```
#elevationUrlInput:disabled {
  background-color: rgba(0, 0, 0, 0.4);
  opacity: 0.5;
  cursor: not-allowed;
}

.primary-btn {
  width: 100%;
  padding: 10px;
  background-color: var(--accent-color);
  color: white;
  border: none;
  border-radius: 6px;
  font-size: 16px;
  font-weight: bold;
  cursor: pointer;
  transition: background-color 0.2s;
  margin-top: 10px;
}

.primary-btn:hover {
  background-color: #0099f7;
}

.context-method-name {
  color: #4fc3f7;
  font-size: 0.9em;
  font-style: italic;
}
```