



KATEDRA GEOINFORMATIKY

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

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

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: P1314 Geografie
Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie
Školitel: prof. RNDr. Vít VOŽENÍLEK, CSc.

Mgr. Jakub ŽEJDLÍK

GEOVISUALIZATION ENVIRONMENT FOR VISUAL ANALYSIS IN 3D: CONCEPT, METHODS, IMPLEMENTATION

PH.D. THESIS SUMMARY

Study Programme: Geography
Specialization: Geoinformatics and Cartography
Supervisor: Prof. Dr. Vít VOŽENÍLEK

Department of Geoinformatics
Faculty of Science, Palacký University Olomouc

Olomouc 2026

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

Dissertation thesis was compiled within Ph.D. studies at the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc, Czech Republic.

Předkladatel / Submitter:

Mgr. Jakub Žejdlík

Školitel / Supervisor:

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Katedra geoinformatiky

Přírodovědecká fakulta

Univerzita Palackého v Olomouci

17. listopadu 50

771 46 Olomouc

Obhajoba disertační práce se koná před komisí pro obhajoby disertačních prací doktorského studia v oboru P1314 Geografie, studijním oboru 1302V011 Geoinformatika a kartografie, v prostorách Katedry geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

The defence of the dissertation thesis will be held at the commission for the defence of dissertation thesis of Ph.D. degree in study programme P1301 Geography, specialization Geoinformatics and Cartography, in the premises of the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc.

The dissertation thesis is available at the Study Department, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc.

© Jakub Žejdlík, 2026

© Univerzita Palackého v Olomouci, 2026

ISSN 1805-7500

ISBN 978-80-244-6790-0 (print)

Obsah

1. ÚVOD	4
2. CÍLE PRÁCE	6
3. METODY ŘEŠENÍ A POSTUP	8
4. VÝSLEDKY	11
5. DISKUZE.....	16
6. ZÁVĚR	20
7. Seznam použité literatury	22
Summary	23
ŽIVOTOPIS	25
Průběh studia	27
Publikační činnost.....	29

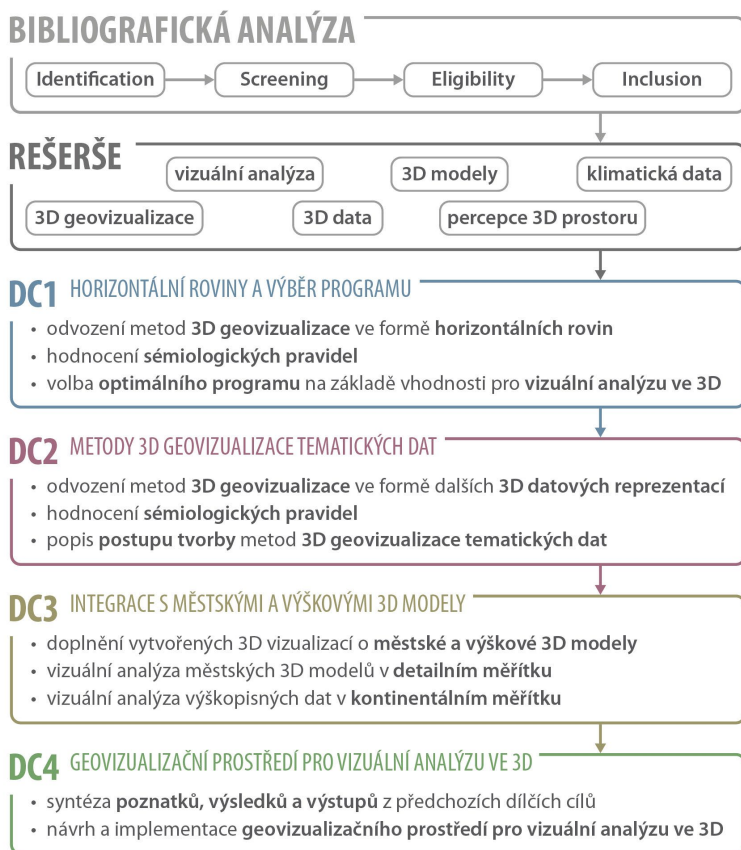
1. ÚVOD

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 vizualizacím 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 (Obrázek 1). 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.



Obrázek 1: Schéma postupu práce s vymezením jednotlivých dílčích cílů

2. 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 zkreslené.
- **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 sémilogických 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 sémilogická 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.

3. METODY ŘEŠENÍ A POSTUP

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

Bibliografická analýza

Bibliografická analýza metodou PRISMA hraje klíčovou roli při **výběru vhodných zdrojů pro další částí 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. 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 článcích, jež souvisí s některým z klíčových slov
- závěrečné práce evidované v systému Theses.cz
- další zdroje literatury (odborné monografie, učebnice kartografie a geoinformatiky, sborníky, příspěvky na konferencích nebo webové stránky)

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., 2020), 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).

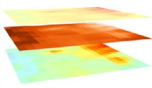
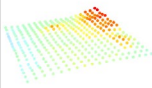
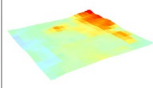
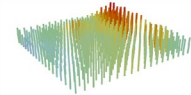
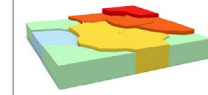
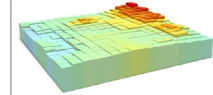
Metody řešení dílčího cíle 1 – Horizontální roviny a výběr programu

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 (Obrázek 2). **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 3D GEOVIZUALIZACE TEMATICKÝCH DAT			
			
horizontální roviny	mračno bodů	3D povrch	vertikální roviny
			
3D kartodiagram	3D kartogram	voxely	

Obrázek 2: Metody 3D geovizualizace tematických dat

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.

4. 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 roztříštěné 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.

Výsledek 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* (Zejdlík a Vozenílek, 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 sémilogických 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* (Zejdlík a Vozenílek, 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**, 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 s využitím programového rozhraní **ArcGIS Maps SDK for JavaScript**. Na tomto prototypu následně proběhlo testování použitelnosti. 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, Zejdlik 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** (Obrázek 3). 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 jednoznačně 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 zkresení 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).



Obrázek 3: Výsledná aplikace *3D-Geo-Vis 2.0*

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 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 a testování použitelnosti prototypu aplikace. Zároveň bylo demonstrováno, že výsledky jsou aplikovatelné napříč různými prostorovými měřítky.

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

Na základě teoretického zhodnocení 16 grafických proměnných a výsledků dotazníkového šetření 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. 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: 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).

5. 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 významně 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 sřejmější 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 platforme 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 nasvícení 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.

6. ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce se komplexně věnovala problematice 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-Vis¹. Na tomto prototypu bylo provedeno cílené testování použitelnosti, které pomohlo identifikovat technologické limity a překážky v uživatelském rozhraní.

¹ aplikace: https://jakubzejdlik.github.io/3d_geo_vis/horizontal.html
zdrojové kódy: https://github.com/jakubzejdlik/3d_geo_vis

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 2.0². 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 prohlížečů, 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 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.

² aplikace: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2

zdrojové kódy: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2

7. Seznam použité literatury

- 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
- 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
- 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
- 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
- GAUTIER, Jacques; Sidonie CHRISTOPHE a M BRÉDIF, 2020. 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
- 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
- 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
- MACEACHREN, Alan M., 2004. *How Maps Work: Representation, Visualization, and Design*. 1st edition. New York: The Guilford Press. ISBN 978-1-57230-040-8.
- 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
- 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
- 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 Vit VOZENILEK, 2025. Methods of 3D geovisualization of thematic data in the context of graphic variables. *International Journal of Cartography*. Online. 0(0), 1–16. ISSN 2372-9333. Dostupné z: doi:10.1080/23729333.2025.2555508

Autoreferát je výběrem z textu disertační práce:

Žejdlík, J. (2026). Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D: koncept, metody, implementace [in print]. Disertační práce. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.

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-Vis³. Targeted usability testing was performed on this prototype, which helped identify technological limitations and obstacles in the user interface.

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

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 2.0⁴. 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 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.

⁴ application: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2

source codes: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2

ŽIVOTOPIS

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno a příjmení: Mgr. Jakub Žejdlík

Bydliště: Olomouc, Česko

Email: jakub.zejdlík@upol.cz



VZDĚLÁNÍ

2022–současnost: Geoinformatika a kartografie (Ph.D.), Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci (disertační práce *Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D: koncept, metody, implementace*)

2020–2022: Geoinformatika a kartografie (Mgr.), Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci (diplomová práce *Tyfloprůvodce pro vybraných památkách Česka*)

2017–2020: Geoinformatika a geografie (Bc.), Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci (bakalářská práce *Tematický atlas Olomouckého kraje v infografickém provedení*)

PRAXE & ZKUŠENOSTI

2022–současnost: Univerzita Palackého v Olomouci
výzkumný pracovník

2024: MAPPA Ostrava

tvorba portálu otevřených dat pocitového mapování Ostravy

2021–2025: Urban Planner, s. r. o.

kartograf – tvorba mapových výstupů pro Analýzy územního potenciálu měst Jihlava, Zlín, Kadaň a Kolín

2020–2022: TERRA-KLUB, o. p. s.

tvorba grafických prvků do časopisu Dnešní svět a školních atlasů

2018–současnost: ZŠ Žamberk, 28. října 581

tvorba a správa webových stránek

PROJEKTY

Sustainability in the European Theme Park Industry

2026–2027, kartograf

Inovace uměleckého vzdělávání a podpora estetického vnímání žáků se zrakovým postižením prostřednictvím haptizace výtvarných děl pomocí 3D tištěných modelů (TAČR SIGMA)

2025–2028, kartograf, grafik

Atlas českého jazyka 2027: celouzemní výzkum nářečí českého jazyka po 50 letech (NAKI III)

2023–2027, kartograf, technický redaktor

Olomouc 3D – nová dimenze kulturního dědictví města: minulost, přítomnost, budoucnost (NAKI III)

2023–2027, GIS specialista, kartograf

Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií IV

2025, kartograf

Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií III

2024, kartograf

SUBEUA (Urbanism and Suburbanization in the EU Countries and Abroad: Reflection in the Humanities, Social Sciences, and the Arts)

2022–2024, kartograf

Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií II

2023, kartograf

Nářečí českého jazyka interaktivně. Dokumentace a zpřístupnění mizejícího jazykového dědictví jako nedílné součásti regionálních identit (NAKI II)

2022, kartograf, technický redaktor

Redukce informačního deficitu a rozvoj představitosti osob se zrakovým postižením prostřednictvím 3D modelů s auditivními prvky

2021–2022, kartograf

Průběh studia

Publikace studenta a veškeré uvedené činnosti vycházejí z náplně doktorského studia a z vědecko-výzkumných aktivit, na kterých se na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci podílel.

Absolvované zkoušky

Ak. rok	Předmět	Datum
2025/26	KGI/PGGVI Geovizualizace a digitální kartografie (prof. RNDr. Vít VOŽENÍLEK, CSc.)	25. 9. 2025
2023/24	KGI/PGST Vědecko-výzkumná stáž	29. 5. 2024
2023/24	KGI/PGKOG Kartografická vizualizace a její kognitivní aspekty (prof. RNDr. Petr KUBÍČEK, CSc.)	4. 4. 2024
2022/23	KGI/PGPPG Plánování a projektování geoinformačních technologií (prof. Ing. Jiří HORÁK, Dr.)	11. 5. 2023
2022/23	KGI/PGVSP Vývoj softwarových prostředků pro open-source GIS (prof. Mgr. Jaroslav HOFIERKA, PhD.)	7. 2. 2023
2022/23	VCJ/PGAJ Anglický jazyk pro doktorské studium	9. 12. 2022
2022/23	PRF/PGMVV Management vědy a výzkumu	16. 11. 2022

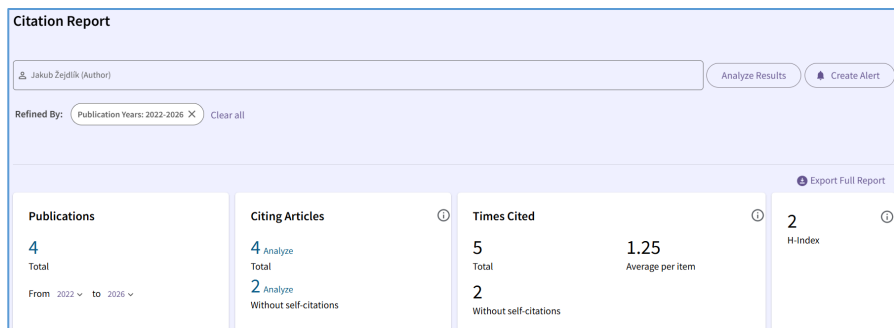
Zahraniční stáže a školy

Akademický rok	Instituce	Termín (počet týdnů)
2023/24	University of Vienna (Vídeň, Rakousko)	duben–květen (4 týdny)

Výuka

Akademické roky	Zkratka a název předmětu	Hodin
2025/26	KGI/GEOKA Geografická kartografie	66
2025/26	KGI/GINEW New issues of geosciences	2
2022/23, 2023/24, 2024/25, 2025/26	KGI/DIGKA Digitální kartografie	80
2022/23, 2023/24, 2024/25, 2025/26	KGI/GPROP Geoinformatická propedeutika	72
2022/23, 2023/24, 2024/25, 2025/26	KGI/KAPR Kartografický projekt	10
2022/23, 2023/24, 2024/25	KGI/GIKRI Geoinformatika v krizovém managementu	9
2023/24, 2024/25	KGI/GI Geoinformatics	4
2024/25	KGI/SYKAR Systematická kartografie	2
2023/24	KGI/VIZUL Pokročilá geovizualizace	2
		celkem: 247

Publikační činnost



** publikace vztahující se k tématu disertační práce*

Odborný časopis a sborník v mezinárodní databázi (WoS, Scopus)

*ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V. (2025). Methods of 3D Geovisualization of Thematic Data in the Context of Graphic Variables. *International Journal of Cartography*, 12(2). DOI: 10.1080/23729333.2025.2555508

ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V. (2025). Exploring Cartographic Differences in Web Map Applications: Evaluating Design, Scale, and Usability. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1), 9. DOI: 10.3390/ijgi14010009

*BITTNER, O., ŽEJDLÍK, J., BURIAN, J., VOŽENÍLEK, V. (2025). Exploring Unconventional 3D Geovisualization Methods for Land Suitability Assessment: A Case Study of Jihlava City. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(7), 269. DOI: 10.3390/ijgi14070269

PÁNEK, J., KONÍČEK, J., ŽEJDLÍK, J. (2025). Integrating Participatory Mapping into Urban Governance: opening data in Ostrava, Czechia. *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*, 5, 24, <https://doi.org/10.5194/ica-adv-5-24-2025>, 2025.

*ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V. (2024). Evaluation of 3D geovisualization of volumetric geospatial data in the form of horizontal planes using selected software. *Geographia Cassoviensis*, 18(1), 5–25. DOI: 10.33542/GC2024-1-01

ŽEJDLÍK, J., VONDRÁKOVÁ, A. (2022). Tvorba tematického atlasu Olomouckého kraje v infografickém provedení. *Kartografické listy*, 30(1), 39-56.

Konferenční příspěvky

ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V. (2025). Srovnání kartografických aspektů vybraných webových mapových aplikací. Brno: 26. kartografická konference. In Brno na mapách: tematický atlas moravské metropole mezi abstrakty 26. kartografické konference. ISBN: 978-80-11-07303-9

ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V., KONÍČEK, J., VONDRÁKOVÁ, A. (2025). Variabilita kompozičních prvků Atlasů nářečí českého jazyka. Brno: 26. kartografická konference. In Brno na mapách: tematický atlas moravské metropole mezi abstrakty 26. kartografické konference. ISBN: 978-80-11-07303-9

***ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V. (2025).** Methods of 3D Geovisualization of Thematic Data in the Context of Graphic Variables. Vancouver: 32nd International Cartographic Conference.

EKANAYAKA, E. M. R. D., **ŽEJDLÍK, J.**, BITTNER, O., POPELKA, S., BURIAN, J., RŮŽIČKA, O., VANÍČEK, T., JAKUBEC, O. (2024). Automated roof generation for the city of Olomouc using ArcGIS CityEngine. Vienna: EuroCarto2024. In Abstracts of the ICA, 7:1-2. DOI: 10.5194/ica-abs-7-35-2024

VANÍČEK, T., POPELKA, S., BURIAN, J., RŮŽIČKA, O., **ŽEJDLÍK, J.**, BITTNER, O., JAKUBEC, O. (2024). Interactive 2D Visualizations of Olomouc's Development as Tools for Revitalizing Cultural Heritage. Vienna: EuroCarto2024. In Abstracts of the ICA, 7:1-2. DOI: 10.5194/ica-abs-7-179-2024

ŽEJDLÍK, J. (2023). Guide to selected monuments of Czechia for people with visual impairment. Olomouc: Symposium ICA Spring Olomouc 2023. In Abstracts of the Symposium ICA Spring Olomouc 2023. Czech Cartographic Society, 2023, s. 88-89. ISBN: 978-80-11-02999-9

ŽEJDLÍK, J. (2022). Tyfloprůvodce po vybraných památkách Česka. Bratislava: GeoKARTO 2022. In Zborník abstraktov z medzinárodnej konferencie konanej 8. – 9. septembra 2022. ISBN: 978-80-89060-27-6

Další účasti na konferencích bez sborníku

ŽEJDLÍK, J., VOŽENÍLEK, V., BURIAN, J. (2024). Prezentace urbanismu a suburbanizace pomocí ArcGIS StoryMaps. Praha: GIS Esri 2024.

***VOŽENÍLEK, V., ŽEJDLÍK, J. (2023).** Exploring Climate Data in 3D by Visualizing Multiple 2D Horizontal Planes. Lublin: Ogólnopolska konferencja kartograficzna Janów Lubelski.

KONÍČEK, J., VONDRÁKOVÁ, A., NÉTEK, R., **ŽEJDLÍK, J.**, IREINOVÁ, M., KUBEČEK, F. (2022). Atlas nářečí českého jazyka – geoinformatická vizualizace původních nářečních dat. Praha: GIS Esri 2022.

Knihy

***ŽEJDLÍK, J. (2026).** Geovizualizační prostředí pro vizuální analýzu ve 3D: koncept, metody, implementace: Autoreferát disertační práce. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.

VONDRÁKOVÁ, A., RŮŽIČKOVÁ V., BARVÍŘ R., BRUS J., ŠPINAROVÁ G., VACHALOVÁ V., **ŽEJDLÍK, J.**, KRUŠINSKÝ R., FOJTÍKOVÁ ROUBALOVÁ M., BEČICOVÁ K., (2023). Tyflomapy – Tyflomodely – Tyflpomůcky: Rozvoj představitivosti osob se zrakovým postižením prostřednictvím 3D modelů s auditivními prvky. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. 271 s. ISBN 978-80-244-6382-7.

Kapitola v knize

BURIAN, J., VOŽENÍLEK, V., **ŽEJDLÍK, J.** (2025). Population Distribution Mapping: Exploring Geovisualization and Spatial Analysis of Mobile Positioning Data. In Suburbia Reconsidered, Volume 3. Springer, Cham. DOI: 978-3-032-02076-5_13

Atlasy

IREINOVÁ, M., VOŽENÍLEK, V., KONÍČEK, J., ŠIPKOVÁ, M., TEMER, Š., KRCH, T., PŘADKOVÁ, P., **ŽEJDLÍK, J.**, KOMÁRKOVÁ, Z., ŠIMEČKOVÁ, M., KUBEČEK, F., ŠUTA, R., VONDRÁKOVÁ, A., NÉTEK, R. (2025). Atlas nářečí českého jazyka – lokál plurálu substantiv. ISBN: 978-80-244-6725-2. DOI: 10.5507/prf.25.24467252

IREINOVÁ, M., VOŽENÍLEK, V., KONÍČEK, J., TEMER, Š., KRCH, T., PŘADKOVÁ, P., ŠIPKOVÁ, M., KUBEČEK, F., KOZLOVÁ, T., VONDRÁKOVÁ, A., **ŽEJDLÍK, J.**, KOMÁRKOVÁ, Z., ŠIMEČKOVÁ, M., NÉTEK, R. (2024). Atlas nářečí českého jazyka – nominativ a akuzativ plurálu životných maskulin. ISBN: 978-80-244-6561-6. DOI: 10.5507/prf.24.24465616

IREINOVÁ, M., VOŽENÍLEK, V., KONÍČEK, J., KRCH, T., TEMER, Š., PŘADKOVÁ, P., ŠIPKOVÁ, M., KOMÁRKOVÁ, Z., KUBEČEK, F., VONDRÁKOVÁ, A., KOZLOVÁ, T., ŠIMEČKOVÁ, M., **ŽEJDLÍK, J.**, NÉTEK, R. (2023). Atlas nářečí českého jazyka – nominativ singuláru feminin. ISBN: 978-80-244-6413-8. DOI: 10.5507/prf.23.24464138

Mgr. Jakub ŽEJDLÍK

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

**GEOVISUALIZATION ENVIRONMENT FOR VISUAL ANALYSIS IN 3D:
CONCEPT, METHODS, IMPLEMENTATION**

Určeno pro studenty, partnerská akademická pracoviště a odbornou veřejnost.

Odpovědný redaktor Mgr. Jiří Slavík, Ph.D.

Technická redakce Mgr. Jakub Žejdlík

Publikace neprošla redakční jazykovou úpravou.

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci

Křížkovského 8, 771 47 Olomouc

www.vydavatelstvi.upol.cz

vup@upol.cz

1. vydání

Olomouc 2026

Edice GEOINFO-CARTO-THESIS, svazek XXIX.

ISSN 1805-7500

ISBN 978-80-244-6790-0 (print)

VUP 2026/0181 (print)

Neprodejná publikace