

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky



HODNOCENÍ POUŽITELNOSTI INTERAKTIVNÍCH KARTOGRAFICKÝCH VIZUALIZACÍ METODOU EYE-TRACKING

*USABILITY EVALUATION OF INTERACTIVE CARTOGRAPHIC VISUALISATIONS
BY MEANS OF EYE-TRACKING*

Doktorská disertační práce

Mgr. Tomáš VANÍČEK

Vedoucí práce doc. RNDr. Stanislav Popelka, Ph.D.

Olomouc 2026

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Disertační práce se zabývá hodnocením použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking. Jejím hlavním cílem bylo zhodnotit použitelnost vybraných interaktivních kartografických produktů a navrhnout metodologicky ukotvený postup pro jejich hodnocení s využitím metody eye-tracking a doplňkových metod. Práce reaguje na skutečnost, že interaktivní mapová prostředí se od statických kartografických stimulů zásadně liší svou dynamikou, proměnlivým obsahem, změnami měřítka, interakcemi uživatele a stavem rozhraní, což komplikuje tradiční postupy analýzy eye-tracking dat. Řešení bylo založeno na třech navazujících částech: systematickém zmapování dosavadního výzkumu, výběru a syntéze vhodných metod a realizaci pěti případových studií. Ty zahrnovaly interaktivní mapy v datové žurnalistice, historický mapový srovnávač, statický a interaktivní atlas, srovnání práce s mapou na desktopovém a mobilním zařízení a hodnocení interaktivní 3D geovizualizační aplikace. Výsledky ukázaly, že eye-tracking je pro hodnocení interaktivních map velmi přínosný, avšak jeho interpretace vyžaduje propojení s dalšími datovými zdroji, zejména s logováním uživatelských interakcí, metrikami účinnosti a efektivnosti, dotazníkovým šetřením, verbalizačními metodami a kvalitativní inspekci záznamů. Hlavním metodologickým výstupem práce je metodologické schéma pro analýzu dynamických 2D interaktivních kartografických vizualizací při použití stacionárního eye-trackeru, které může sloužit jako inspirace pro další výzkum i praktické testování mapových aplikací.

KLÍČOVÁ SLOVA

interaktivní kartografické vizualizace; eye-tracking; hodnocení použitelnosti; kognitivní kartografie; logování interakcí

Počet stran práce: 266

Počet příloh: 0

ANOTATION

The dissertation deals with the usability evaluation of interactive cartographic visualisations by means of eye-tracking. Its main aim was to evaluate the usability of selected interactive cartographic products and to propose a methodologically grounded procedure for their evaluation using eye-tracking and complementary methods. The thesis responds to the fact that interactive map environments differ fundamentally from static cartographic stimuli due to their dynamic nature, changing content, scale changes, user interactions, and interface states, which complicate traditional approaches to eye-tracking data analysis. The solution was based on three interconnected parts: a systematic mapping of existing research, the selection and synthesis of suitable methods, and the implementation of five case studies. These included interactive maps in data journalism, a historical map comparison application, a static and interactive atlas, a comparison of map use on desktop and mobile devices, and the evaluation of an interactive 3D geovisualisation application. The results showed that eye-tracking is highly valuable for evaluating interactive maps, but its interpretation requires integration with other data sources, particularly interaction logging, effectiveness and efficiency metrics, questionnaire surveys, verbalisation methods, and qualitative inspection of recordings. The main methodological output of the thesis is a methodological scheme for analysing dynamic 2D interactive cartographic visualisations when using a stationary eye-tracker, which may serve as inspiration for further research and practical testing of map applications.

KEYWORDS

interactive cartographic visualisations; eye-tracking; usability evaluation; cognitive cartography; interaction logging

Number of pages: 266

Number of appendices: 0

PROHLÁŠENÍ

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,
- ✓ beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, disertační práci užívat (§ 35 odst. 3),
- ✓ 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 mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne 21. 05. 2026

Mgr. Tomáš Vaníček



PODĚKOVÁNÍ

„Kdo nám vyčítá nedostatky, zaslouží si naši vděčnost.“

– Blaise Pascal (francouzský filozof, matematiky, fyzik a spisovatel)

Chtěl bych touto vyjádřit upřímné poděkování školiteli této disertační práce, **doc. RNDr. Stanislavu Popelkovi, Ph.D.**, za jeho odborné vedení, cenné připomínky, podnětné diskuse a dlouhodobou podporu, kterou mi během celého doktorského studia i při zpracování této práce poskytoval.

Poděkování patří rovněž kolegům a přátelům z Katedry geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci za inspirativní pracovní prostředí, otevřenou spolupráci a přátelskou atmosféru, která významně přispěla k odbornému i osobnímu rozvoji. Zvláštní poděkování náleží Mgr. Markétě Beitlové, Ph.D., Mgr. Michaele Vojtěchovské, Bc. Jonáši Košťálovi a Mgr. Jakubu Žejdlíkovi za skvělou spolupráci při řešení případových studií v praktické části této práce.

Rád bych rovněž poděkoval všem participantům, kteří se dobrovolně zapojili do experimentů realizovaných v rámci pěti případových studií. Bez jejich aktivní účasti by nebylo možné realizovat praktickou část této disertační práce.

Během zahraniční stáže na Univerzitě v Salzburgu jsem měl možnost spolupracovat s řadou inspirativních osobností; jmenovitě děkuji Merve Keskin z University of Salzburg za odborné konzultace, sdílení zkušeností a vstřícný přístup.

Poděkování patří také všem dalším akademickým pracovníkům, jejichž vědecká činnost a publikace představovaly významný zdroj poznání a inspirace při zpracování této disertační práce. Velmi si vážím možnosti pracovat v době, kdy jsou dostupné rozsáhlé zdroje odborné literatury a moderní technologické nástroje podporující výzkum.

V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za trpělivost, podporu a povzbuzení, které mi po celou dobu doktorského studia poskytovali. Jejich zázemí a důvěra pro mne byly zásadní oporou.

Závěrem byla tato disertační práce podpořena řadou projektů:

1. *Interní grantová agentura Univerzity Palackého (IGA):*
 - a. *Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií II (IGA_PrF_2023_017),*
 - b. *Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií III (IGA_PrF_2024_018),*
 - c. *Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií IV (IGA_PrF_2025_002),*
 - d. *Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií V (IGA_PrF_2026_010).*
2. *Grantová agentura České republiky (GAČR), projekt „Identifikace bariér v procesu komunikace prostorových sociálně-demografických informací“ (23-06187S).*
3. *Program NAKI III, projekt „Olomouc 3D – nová dimenze kulturního dědictví města: minulost, přítomnost, budoucnost“ (DH23P030VV018).*

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	CÍLE PRÁCE.....	12
2.1	Hlavní cíl práce.....	12
2.2	Dílčí cíle práce	12
3	PŘEHLED METOD A POSTUP ZPRACOVÁNÍ.....	14
4	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	20
4.1	Hodnocení použitelnosti	21
4.1.1	Vymezení hodnocení použitelnosti	21
4.1.2	Uživatelsky zaměřený design.....	26
4.1.3	Kognitivní procesy uživatele	28
4.2	Interaktivní kartografické vizualizace	29
4.2.1	Vymezení pojmu „interaktivní kartografická vizualizace“ (IKV)	32
4.2.2	Dělení webových/interaktivních map	37
4.2.3	Interaktivní mapy v kontextu hodnotících studií	46
4.3	Metoda eye-tracking.....	50
4.3.1	Fyziologická a percepční východiska metody.....	51
4.3.2	Základní oční pohyby	52
4.3.3	Historický vývoj metody eye-tracking	54
4.3.4	Technologie a typy eye-trackerů	55
4.3.5	Eye-tracking v kartografii a ve studiích hodnocení použitelnosti.....	58
4.3.6	Kombinace eye-tracking metody s dalšími metodami	60
5	SYSTEMATICKÉ ZMAPOVÁNÍ STÁVAJÍCÍHO VÝZKUMU (DC1)	62
5.1	Průzkum existujících přehledových studií.....	63
5.2	Výzkumné otázky pro DC1	66
5.3	Identifikace studií (<i>identification</i>)	66
5.3.1	Web of Science (WoS)	67
5.3.2	Scopus.....	68
5.3.3	ACM Digital Library.....	68
5.3.4	Jiné zdroje	69
5.4	Třídění studií (<i>screening</i>).....	69
5.5	Posouzení relevance studií (<i>eligibility</i>)	70
5.6	Začlenění studií (<i>inclusion</i>)	70
5.7	Interaktivní tabulka s přehledem studií.....	72
5.8	Rozbor studií na základě výzkumných otázek (V01-V07)	73
5.8.1	V01: Jaké mezery ve výzkumu jsou nejčastěji identifikovány v současné literatuře?	73
5.8.2	V02: Jaké typy IKV jsou v těchto studiích nejčastěji hodnoceny?.....	75

5.8.3	VO3: Jaké techniky související s metodou eye-tracking jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?	77
5.8.4	VO4: Jaké typy úkolů jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?	79
5.8.5	VO5: Kolik participantů je obvykle rekrutováno do eye-tracking studií pro IKV a jaké jsou jejich charakteristiky?	81
5.8.6	VO6: Jaké praktické aplikace mají výsledky eye-tracking studií v reálných scénářích?	83
5.8.7	VO7: Jak se v průběhu času vyvíjely výzkumné eye-tracking přístupy při hodnocení použitelnosti IKV?	85
6	VÝBĚR A SYNTÉZA METOD ^(DC2)	88
6.1	Metriky pro analýzu očních pohybů	90
6.2	Analytické instrumentarium pro analýzu očních pohybů	95
6.2.1	Komplexní platformy pro eye-tracking	96
6.2.2	Nástroje pro mobilní eye-tracking	99
6.2.3	Nástroje pro sekvenční a komparační analýzu	100
6.2.4	Nástroje pro webcam-based eye-tracking	102
6.2.5	GIS-orientované nástroje	106
6.2.6	Empirická zkušenost s nástroji pro eye-tracking	110
6.3	Verbalizační metody	112
6.3.1	Think-aloud metoda	112
6.3.2	Talk-aloud metoda	114
6.4	Metriky použitelnosti (efektivnost, účinnost, spokojenost)	115
6.5	Logování uživatelských interakcí	116
6.6	Fyziologické a biometrické metody	118
6.7	Další existující doplňkové metody	119
6.8	Závěrečný výběr a syntéza metod	120
7	SADA PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ ^(DC3)	123
7.1	Interaktivní mapy v datové žurnalistice ^(PS1)	124
7.1.1	Hodnocený produkt ^(PS1)	125
7.1.2	Zadání úloh a průběh experimentu ^(PS1)	126
7.1.3	Participantů ^(PS1)	129
7.1.4	Analýza dat ^(PS1)	130
7.1.5	Hlavní zjištění ^(PS1)	135
7.2	Interaktivní srovnávač map „Proměny Olomouce v čase“ ^(PS2)	139
7.2.1	Hodnocený produkt ^(PS2)	140
7.2.2	Zadání úloh a průběh experimentu ^(PS2)	142
7.2.3	Participantů ^(PS2)	145
7.2.4	Analýza dat ^(PS2)	145
7.2.5	Hlavní zjištění ^(PS2)	150

7.3	Interaktivní atlas a jeho statická varianta ^(PS3)	155
7.3.1	Hodnocený produkt ^(PS3)	156
7.3.2	Zadání úloh a průběh experimentu ^(PS3)	158
7.3.3	Participanti ^(PS3)	162
7.3.4	Analýza dat ^(PS3)	164
7.3.5	Hlavní zjištění ^(PS3)	187
7.4	Uživatelské interakce na stolním a mobilním zařízení ^(PS4)	191
7.4.1	Hodnocený produkt ^(PS4)	192
7.4.2	Zadání úloh a průběh experimentu ^(PS4)	194
7.4.3	Participanti ^(PS4)	198
7.4.4	Analýza dat ^(PS4)	199
7.4.5	Hlavní zjištění ^(PS4)	205
7.5	Interaktivní 3D aplikace „3D-Geo-Vis“ ^(PS5)	208
7.5.1	Hodnocený produkt ^(PS5)	209
7.5.2	Zadání úloh a průběh experimentu ^(PS5)	211
7.5.3	Participanti ^(PS5)	214
7.5.4	Analýza dat ^(PS5)	215
7.5.5	Hlavní zjištění ^(PS5)	221
8	VÝSLEDKY	238
9	DISKUSE	246
10	ZÁVĚR	254
11	SUMMARY	256
12	BIBLIOGRAFIE	258
13	PŘÍLOHY	266

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
2D	dvojměrný
3D	trojměrný
ACM	Association for Computing Machinery
AI	Artificial Intelligence
AOI	Area of Interest
AR	Augmented Reality
AVD	Attribute Visualisation Duration
BCI	Brain-Computer Interface
CNN	Cable News Network
COVID-19	COronaVirus Disease 2019
CSV	Comma-Separated Values
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DC	Dílčí cíl
DL	Digital Library
ECG / EKG	Electrocardiography / Elektrokardiografie
EEG	Electroencephalography / Elektroencefalografie
EMG	Electromyography / Elektromyografie
ET	Eye Tracking
FDP	Fixation Distance Plot
FIX	Fixace
fNIRS	functional Near-Infrared Spectroscopy
GAČR	Grantová agentura České republiky
GIS	Geografický informační systém
GOMS	Goals, Operators, Methods, Selection
GP	GazePoint
GPT	Generative Pre-trained Transformer
GSR	Galvanic Skin Response
GUI	Graphical User Interface
GVIS	GeoVisualisation
HCI	Human-Computer Interaction
HD	High Definition
HDP	Hrubý domácí produkt
HTC	High Tech Computer
HTML	HyperText Markup Language
ICA	International Cartographic Association
ICA	Index of Cognitive Activity
ICC	International Cartographic Conference
ID	Identifikátor
I-DT	Identification by Dispersion Threshold
IEC	International Electrotechnical Commission
IKV	Interaktivní kartografická vizualizace
INNM	Index normalizované náročnosti mapování
ISO	International Organization for Standardization
I-VT	Identification by Velocity Threshold

JSON	JavaScript Object Notation
LM	Language Model
ML	MapLogger
MoCap	Motion Capture
MR	Mixed Reality
MSQ	Minnesota Satisfaction Questionnaire
NAKI	Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity
NASA TLX	NASA Task Load Index
P	Participant
P-CR	Pupil–Corneal Reflection
PDF	Portable Document Format
POI	Point of Interest
PRISMA-ScR	Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews
PřF	Přírodovědecká fakulta
PS	Případová studie
Q	Question
QGIS	Quantum GIS
RAW	bod pohledu
SDK	Software Development Kit
SMI	SensoMotoric Instruments
SUS	System Usability Scale
SVM	Support Vector Machines
T	Task
TOI	Time of Interest
TSV	Tab-Separated Values
TTFC	Time To First Click
TTFF	Time To First Fixation
U.S.	United States
UCD	User-Centred Design
UE	Usability Engineering
UEQ	User Experience Questionnaire
UI	User Interface
UP	Univerzita Palackého
URL	Uniform Resource Locator
UX	User Experience
VO	Výzkumná otázka
VP	Volné procházení
VPA	Verbal Protocol Analysis
VR	Virtual Reality
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.
WGS	World Geodetic System
WoS	Web of Science
WWW	World Wide Web
XLSX	eXcel Spreadsheet XML

ÚVOD

1 ÚVOD

Kartografie se v posledních desetiletích výrazně proměnila. Mapa již stále častěji nevystupuje pouze jako statické grafické dílo, ale jako **interaktivní rozhraní**, prostřednictvím kterého uživatel vyhledává, porovnává, filtruje a interpretuje prostorové informace. Interaktivní kartografické vizualizace se staly běžnou součástí webových mapových aplikací, mobilních služeb, datové žurnalistiky, digitálních atlasů, historických mapových portálů i 3D geovizualizačních prostředí. Tato proměna rozšiřuje možnosti kartografické komunikace, zároveň však klade vyšší nároky na návrh rozhraní, srozumitelnost ovládacích prvků a podporu uživatelského porozumění.

Rostoucí míra interaktivity však přináší metodologickou výzvu pro hodnocení použitelnosti map. U statické mapy je možné poměrně přesně určit, jaký vizuální obsah měl uživatel k dispozici. U interaktivní mapy se však viditelný obsah mění v závislosti na zoomu, posunu mapy, přepínání vrstev, volbě režimu zobrazení nebo manipulaci s parametry vizualizace. Stejná pozice na obrazovce proto může v různých okamžicích reprezentovat odlišný geografický prostor, jinou mapovou vrstvu nebo jiný stav uživatelského rozhraní. Hodnocení použitelnosti těchto produktů tak nelze založit pouze na postupech převzatých ze statických kartografických experimentů.

Významným nástrojem pro zkoumání práce uživatelů s mapami je **metoda eye-tracking**, která umožňuje zaznamenávat průběh vizuální pozornosti. V kontextu interaktivních kartografických vizualizací je cenná zejména pro identifikaci přehlížených prvků, nejasných částí rozhraní, strategií řešení úloh a situací, v nichž uživatelé narážejí na interpretační nebo interakční bariéry. Sama o sobě však neposkytuje úplné vysvětlení uživatelského chování, protože pohled na prvek ještě neznamená jeho pochopení a fixace na mapu nemusí znamenat správnou interpretaci zobrazených dat.

Z tohoto důvodu je v této disertační práci metoda eye-tracking chápána jako součást **širšího metodologického rámce** pro hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací. Práce vychází z poznatků kognitivní kartografie, human-computer interaction a uživatelsky zaměřeného designu. Eye-tracking je kombinován zejména s analýzou úspěšnosti a času řešení úloh, logováním uživatelských interakcí, dotazníkovým šetřením, verbalizačními metodami a kvalitativní inspekci záznamů. Cílem tohoto propojení je hodnotit nejen to, kam se uživatel díval, ale také co s mapovým rozhraním dělal, zda dosáhl cíle a jak aplikaci subjektivně vnímal.

Předkládaná disertační práce **reaguje na metodologickou roztržičnost** dosavadního výzkumu a na praktické obtíže spojené se zpracováním eye-tracking dat z dynamických kartografických rozhraní. Postupuje od systematického zmapování existujících studií přes výběr a syntézu vhodných metod až po realizaci pěti případových studií zahrnujících interaktivní mapy v datové žurnalistice, historický mapový srovnávač, statický a interaktivní atlas, srovnání práce s mapou na počítačovém a mobilním zařízení a hodnocení interaktivní 3D geovizualizační aplikace. Výsledkem práce je empiricky podložený **metodologický rámec**, který ukazuje, jak lze při hodnocení interaktivních kartografických vizualizací kombinovat vizuální, behaviorální, výkonnostní a subjektivní data.

CÍLE PRÁCE

2 CÍLE PRÁCE

Cíle práce jsou děleny na **hlavní cíl** práce a na **dílčí cíle** práce.

2.1 Hlavní cíl práce

Hlavním cílem disertační práce je **zhodnotit použitelnost vybraných interaktivních kartografických vizualizací prostřednictvím metody sledování pohybu očí (eye-tracking)**. V případech, kde to bude vhodné, bude metoda eye-tracking doplněna o další přístupy, jako je think-aloud nebo logování uživatelských interakcí. Mezi experimentální stimuly budou patřit především interaktivní 2D webové mapy.

V úvodní části práce budou představeny teoretické základy kognitivní kartografie a navrženy vhodné výzkumné metody pro realizaci praktických experimentů s využitím metody eye-tracking, případně v kombinaci s dalšími objektivními či subjektivními metodami (např. think-aloud). Součástí bude také analýza možností a omezení těchto metod (např. otázky přesnosti, interpretace výsledků) a diskuse způsobů zpracování a vizualizace dat získaných při práci s interaktivními stimuly.

Na základě těchto přípravných kroků budou navrženy a realizovány případové studie zaměřené na hodnocení použitelnosti **vybraných interaktivních vizualizací** v kontextu kognitivní kartografie. Experimenty budou zahrnovat návrh a realizaci výzkumného designu, sběr a následné vyhodnocení naměřených dat.

Výstupem disertační práce budou:

1. **poznatky o použitelnosti** vybraných interaktivních kartografických produktů,
2. **soubor doporučení**, jak efektivně postupovat při hodnocení těchto vizualizací prostřednictvím metody eye-tracking a souvisejících metod.

2.2 Dílčí cíle práce

Hlavní cíl bude naplněn prostřednictvím **tří dílčích cílů (DC1-DC3)**:

→ DC1 – Systematické zmapování stávajícího výzkumu:

Záměrem bude zhotovit **systematický přehled** dosavadních studií hodnotících interaktivní kartografické vizualizace, které primárně využívaly metodu eye-tracking. Metodologickým rámcem bude **PRISMA-ScR**. Literatura bude vyhledávána v relevantních databázích (např. Web of Science a Scopus). Výsledkem bude přehled dosavadních eye-tracking studií aplikovaných na interaktivní kartografické stimuly a analýza identifikovaných studií se zaměřením na kritické aspekty pro navazující praktickou experimentální část práce.

→ DC2 – Výběr a syntéza metod:

Tato část práce bude zaměřena na **systematický výběr, ověření a syntézu metod** vhodných pro hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací. Vycházet bude z poznatků získaných v rámci DC1, které budou dále rozpracovány a konfrontovány s praktickým testováním vybraných nástrojů a přístupů. Pozornost bude soustředěna

především na metody kombinovatelné s metodou eye-tracking (např. logování uživatelských interakcí, verbalizační metody a další). Součástí této části bude rovněž **deskriptivní přehled a empirické zhodnocení** vybraných nástrojů pro analýzu eye-tracking dat, přičemž důraz bude kladen na jejich využitelnost v kontextu interaktivních map. Na základě těchto poznatků bude usilováno o návrh komplexního **metodologického přístupu**, který bude reflektovat specifika dynamických kartografických stimulů. Hlavním předpokládaným výstupem DC2 bude syntetizující **metodologické schéma**. Toto schéma by mělo umožnit volbu vhodné kombinace metod v závislosti na typu interaktivní kartografické vizualizace a typu eye-tracking zařízení. Navržený rámec bude vycházet jak z poznatků z literatury (DC1), tak z empirických zkušeností autora a měl by představovat metodologický základ pro realizaci navazujících případových studií v rámci DC3.

→ DC3 – Realizace případových studií:

Těžištěm výzkumu bude realizace **sady pěti případových studií** zaměřených na hodnocení použitelnosti vybraných interaktivních kartografických vizualizací a na **ověření metodických postupů** navržených v rámci DC2. Stimuly budou tvořit různé typy kartografických produktů, zejména interaktivní 2D mapy, webové mapové aplikace, atlasové produkty a 3D interaktivní geovizualizace. Hodnocen bude nejen kartografický obsah, ale také uživatelské rozhraní, objevitelnost interaktivních prvků, strategie práce uživatelů, úspěšnost a efektivnost řešení úloh a subjektivní hodnocení testovaných produktů. Podle charakteru jednotlivých případových studií bude eye-tracking doplněn o další metody. Výstupem budou **naměřená a vyhodnocená data, doporučení pro zlepšení** použitelnosti konkrétních testovaných vizualizací a empirické podklady pro **zpřesnění metodologického rámce** navrženého v předchozí části práce.

→ Výsledky (DC1 + DC2 + DC3):

Závěrečná kapitola disertační práce bude představovat **syntézu poznatků** získaných v rámci systematického zmapování stávajícího výzkumu (DC1), výběru a syntézy metod hodnocení použitelnosti (DC2) a realizovaných případových studií (DC3) – **Obrázek 1**. Výsledkem nebude pouze shrnutí dílčích zjištění, ale jejich **propojení do uceleného rámce**. Na základě získaných poznatků bude zpřesněno původní **metodologické schéma** z DC2. Formulována budou také **obecná zjištění** o využití metody eye-tracking a **metodologická a praktická doporučení**. Výstupem práce tak bude empiricky podložený a metodologicky ukotvený postup pro hodnocení interaktivních kartografických vizualizací.



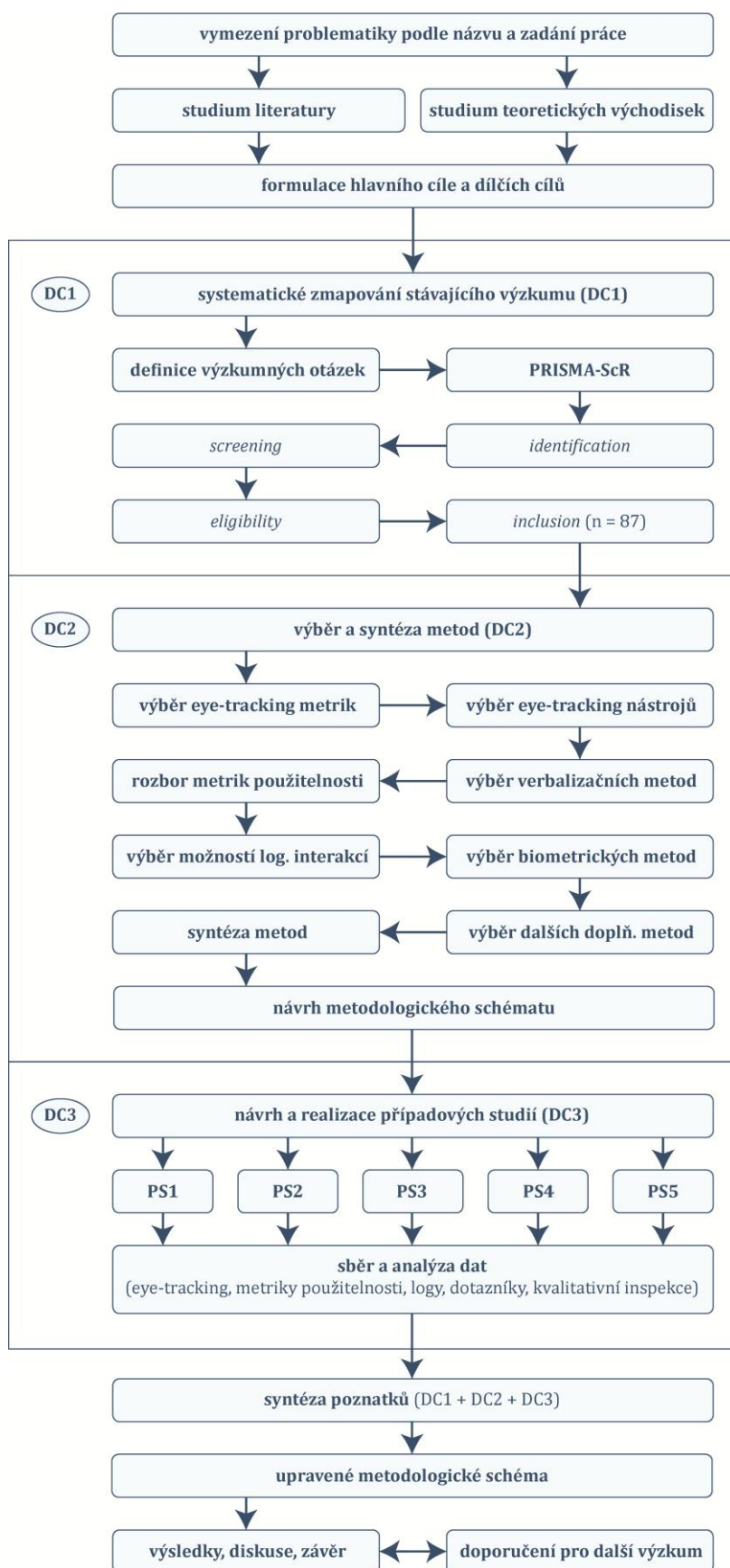
Obrázek 1: Naplnění hlavního cíle práce prostřednictvím tří dílčích cílů.

— PŘEHLED METOD A POSTUP ZPRACOVÁNÍ —

3 PŘEHLED METOD A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola poskytuje přehled metod, dat, technického a programového vybavení a celkového postupu zpracování disertační práce. Jejím účelem není detailně rozebrat všechny teoretické souvislosti ani uvádět kompletní interpretaci výsledků, protože ty jsou podrobně popsány v navazujících kapitolách. Kapitola naopak shrnuje, jakými postupy byl naplňován hlavní cíl práce, jaké typy dat byly vytvořeny a analyzovány, jaké přístroje a programové nástroje byly použity a v jaké logické a časové posloupnosti práce probíhala. Celý postup zpracování schematicky znázorňuje **Obrázek 2**.

Napříč celou prací je používán anglický termín „**eye-tracking**“. Důvodem je jeho silné ukotvení v mezinárodní odborné literatuře a mezioborové terminologii kognitivní kartografie, HCI, UX, psychologie, GIScience a experimentálního výzkumu uživatelského chování. Termín je v práci ponechán v jednotné podobě „eye-tracking“ a není skloňován, aby byla zachována terminologická konzistence. **Metoda eye-tracking** je zde chápána jako empirická metoda měření očních pohybů, při níž je pomocí specializovaného zařízení zaznamenávána poloha a pohyb očí participanta při sledování vizuálního stimulu. V kartografickém výzkumu je takovým stimulem typicky mapa, mapová aplikace, atlas, 3D geovizualizace nebo jiné kartografické či geovizualizační rozhraní. V této práci byla metoda eye-tracking využita především pro analýzu vizuální pozornosti, identifikaci sledovaných a přehlížených prvků rozhraní, podporu interpretace strategií řešení úloh a doplnění tradičních metrik použitelnosti. Vzhledem k mezioborovému charakteru práce jsou v textu ponechány také některé další **anglické odborné výrazy**, zejména v případech, kdy jejich český překlad není v odborné komunitě ustálený, mohl by být významově nepřesný nebo by ztěžoval porozumění v návaznosti na použitou literaturu, software a metodologii. To se týká například vybraných pojmů z oblasti metody eye-tracking, human-computer interaction, user experience (UX), webové kartografie a analýzy uživatelských interakcí. Z obdobných důvodů jsou některé obrázky v práci záměrně ponechány v anglickém jazyce. Část z nich byla vytvořena také pro související odborné články autora, u nichž byla angličtina výchozím publikačním jazykem. Některé převzaté obrázky jsou zároveň uvedeny v původní podobě, vždy s deklarováním zdroje, aby nebyla narušena jejich informační hodnota, terminologická přesnost nebo vazba na původní kontext. Tento postup byl zvolen s cílem zachovat odbornou srozumitelnost, konzistenci a návaznost disertační práce na mezinárodní literaturu i publikační výstupy autora.



Obrázek 2: Postup zpracování disertační práce.

V této práci je nutné rozlišovat mezi metodou a metodikou. Metodou je zde chápán konkrétní postup nebo nástroj poznání, například experiment, měření, pozorování, analýza, syntéza nebo komparace. Metodika představuje ucelený systém těchto metod, tedy způsob, jakým byly jednotlivé postupy propojeny pro dosažení výzkumného cíle. V návaznosti na vymezení výzkumných metod podle Šírokého (2011) byly v práci využity jak **empirické** metody, tak obecně **teoretické** metody. Z empirických metod šlo především o experiment, měření a pozorování. **Experiment** byl využit v případových studiích, kde participant plnili předem definované úlohy s interaktivními kartografickými vizualizacemi. **Měření** se týkalo především záznamu pohybů očí, měření času řešení úloh, úspěšnosti řešení, počtu a typu uživatelských interakcí a subjektivního hodnocení prostřednictvím dotazníků. **Pozorování** bylo využito zejména při kvalitativní inspekci záznamů, při sledování chování participantů během testování a při interpretaci problémových situací. Z obecně teoretických metod byly využity zejména analýza, syntéza, komparace, indukce, dedukce, generalizace a abstrakce. **Analýza** byla uplatněna při rozboru literatury, výzkumných studií, eye-tracking metrik, interakčních logů a výsledků případových studií. **Syntéza** sloužila k propojení poznatků z DC1, DC2 a DC3 do výsledného metodologického rámce. **Komparace** byla využita při porovnávání přístupů v literatuře, při srovnání typů metod a nástrojů i při vyhodnocení rozdílů mezi variantami použití map, například mezi statickým a interaktivním atlasem nebo mezi počítačovým a mobilním zařízením.

Základními jednotkami analýzy eye-tracking dat byly fixace, sekvence fixací, trajektorie pohledu (scanpath), AOI a vybrané agregované metriky. **Fixace** byly interpretovány jako relativně stabilní období vizuální pozornosti, **sakadické pohyby** jako rychlé přesuny mezi fixacemi a **AOI** jako předem definované oblasti zájmu odpovídající mapovým prvkům nebo částem rozhraní. U statických nebo méně dynamických stimulů bylo možné AOI vymezovat nad screenshoty nebo referenčními obrázky. U dynamických interaktivních stimulů však bylo nutné pracovat s pokročilejšími postupy, například s **asistovaným mapováním fixací**, tvorbou **mozaik**, **schematickým mapováním**, kvalitativní **inspekci záznamů** nebo propojením záznamů pohledu s **interakčními logy**. Právě tato metodologická otázka představovala jeden z hlavních problémů řešených v disertační práci.

Použitelnost byla v práci vymezena prostřednictvím tří základních dimenzí: účinnosti, efektivnosti a spokojenosti. **Účinnost** byla chápána jako míra, s jakou participant dosáhl požadovaného cíle, typicky ve formě správnosti odpovědi nebo splnění úlohy. Obecně byla vyjadřována jako podíl úspěšně splněných úloh na celkovém počtu úloh. **Efektivnost** byla hodnocena zejména prostřednictvím času potřebného k řešení úlohy, případně počtem interakcí nebo složitostí interakční strategie. Základní časová metrika byla vyjádřena jako rozdíl mezi časem ukončení a časem zahájení úlohy. **Spokojenost** a širší uživatelská zkušenost byly hodnoceny pomocí **standardizovaných** nebo **doplňkových dotazníků**. V několika případových studiích byl použit User Experience Questionnaire (UEQ), který hodnotí šest škál uživatelské zkušenosti: *Atraktivitu, Přehlednost, Účinnost, Spolehlivost, Stimulaci a Originalitu*.

V případové studii **PS1** bylo kromě základních metrik použito také **kompozitní skóre respondenta**, jehož cílem bylo shrnout výkon participanta nejen podle správnosti odpovědí, ale také s ohledem na empirickou obtížnost úloh a rychlost řešení. V případové studii **PS3** byl dále navržen **index normalizované náročnosti mapování** (INNM), který sloužil ke srovnání pracnosti různých postupů zpracování eye-tracking dat z dynamického kartografického

prostředí. Tento index vycházel ze vztahu mezi skutečnou délkou mapování fixací, délkou úlohy a počtem fixací. Jeho obecná interpretace byla založena na poměru skutečné a očekávané délky mapování.

Vedle eye-tracking byla využita metoda **logování uživatelských interakcí**. Tato metoda spočívala v automatizovaném záznamu akcí, které participant provedl v interaktivní mapové aplikaci. Zaznamenávány byly například změny URL, přepínání vrstev, volba vizualizačních režimů, kliknutí, otevření pop-up oken, pohyb v mapě, změna měřítko nebo další události definované konkrétní aplikací. Logování interakcí bylo důležité především proto, že samotná eye-tracking data ukazují, kam se participant díval, ale neříkají, jaké konkrétní interakce provedl. Propojení obou datových vrstev umožnilo rekonstruovat nejen vizuální pozornost, ale také průběh práce s rozhraním. V práci byly využity různé formy logování, zejména **URL logy** z aplikace „Proměny Olomouce v čase“, interakční záznamy z nástroje **MishPink** (představen v PS4), logování pomocí vlastního nástroje **MapLogger** (podrobněji představen v PS3 a PS5) a v některých případech události zaznamenané v prostředí **Tobii Pro Lab** (zejména v PS2).

Další doplňkovou metodou byly **verbalizační metody**, primárně **talk-aloud**. Verbalizační metody sloužily k doplnění objektivních záznamů o interpretační vrstvu. V této práci nebyly používány jako plnohodnotná lingvistická nebo psychologická analýza všech myšlenkových procesů, ale především jako podpůrná metoda pro zachycení odpovědí, komentářů, nejistoty, změn strategie a důvodů chování participanta. V souladu s charakterem jednotlivých studií byly verbalizace využity buď přímo během plnění úloh nebo jako součást moderátorských poznámek a následné **kvalitativní inspekce záznamů**. Výhodou tohoto přístupu bylo, že pomohl vysvětlit situace, ve kterých eye-tracking data nebyla interpretačně jednoznačná.

Datovou základnu disertační práce tvořily tři hlavní skupiny dat. První skupinu představovala **bibliografická a metadatová data** získaná v rámci systematického zmapování stávajícího výzkumu. Literatura byla vyhledávána v databázích Web of Science, Scopus a ACM Digital Library a výběr studií byl realizován podle rámce **PRISMA-ScR**. Výsledkem bylo zařazení 87 studií, které byly dále kódovány a analyzovány podle výzkumných otázek zaměřených na typy interaktivních kartografických vizualizací, úlohy, metriky, participanty, výzkumné mezery, praktické aplikace a vývoj oboru.

Druhou skupinu dat tvořila **experimentální data z pěti případových studií**. V **PS1** byla analyzována data z testování pěti interaktivních mapových vizualizací v prostředí datové žurnalistiky. Studie zahrnovala 44 participantů, osm úloh a dvě explorativní části. Data tvořily eye-tracking záznamy, AOI metriky, čas řešení úloh, správnost odpovědí, slovní odpovědi participantů a kvalitativní poznámky. V **PS2** byla hodnocena aplikace „Proměny Olomouce v čase“, která umožňuje interaktivní porovnávání historických map a ortofotomap. Data tvořily eye-tracking záznamy, UEQ, doplňkový dotazník, časové informace a URL záznamy stavu aplikace. V **PS3** byla analyzována práce participantů se statickým a interaktivním atlasem. Zde byla hlavním výstupem zejména metodologická data o způsobech mapování fixací a o náročnosti zpracování eye-tracking záznamů. V **PS4** byla využita webová aplikace **MishPink** vytvořená autorským kolektivem, která umožnila srovnat práci s interaktivními mapami na stolním a mobilním zařízení. Datovou základnu tvořily eye-tracking záznamy a podrobné logy interakcí. V **PS5** byla hodnocena webová 3D aplikace „3D-Geo-Vis“, přičemž data zahrnovala eye-tracking záznamy, interakční logy získané pomocí MapLogger, UEQ, doplňkový dotazník a výsledky řešení úloh.

Třetí skupinu dat představovaly **podpůrné pracovní výstupy** vzniklé během analytického zpracování. Šlo zejména o **tabulky** v CSV, TSV a XLSX formátu, exporty z eye-tracking softwaru, ručně nebo poloautomaticky vytvořené AOI, záznamy TOI, exporty dotazníkových odpovědí, sekvence navštívených AOI, vizualizace sekvencí fixací, interakční logy, tabulky s výpočty, poznámky z kvalitativní inspekce a odvozené soubory pro syntézu výsledků.

Pro sběr dat byla použita **různá technická zařízení** podle povahy stimulu a konkrétní případové studie. V PS1 byl použit stacionární eye-tracker **Tobii Pro Spectrum** se vzorkovací frekvencí 300 Hz. V PS2 a PS5 byly využity stacionární eye-trackery **Tobii Pro Spark** se vzorkovací frekvencí 60 Hz. V PS3 byl pro práci s interaktivním atlasem použit stacionární eye-tracker **Tobii Pro Spectrum** a pro práci se statickým atlasem mobilní eye-tracking brýle **Tobii Pro Glasses 3**. V PS4 byly použity zařízení **GazePoint GP3-HD** pro stolní počítač a **GP3-Mobile** pro mobilní telefon. Všechna testování probíhala v kontrolovaných podmínkách, aby bylo možné zajistit srovnatelnost záznamů, kvalitu kalibrace a minimalizaci rušivých vlivů.

Z hlediska programového vybavení byly využity zejména Tobii Pro Lab, GazePoint Analysis Professional, GazePlotter, MapLogger, MishPink, CartoLogger, Microsoft Excel a další podpůrné nástroje. **Tobii Pro Lab** sloužil k návrhu experimentů, záznamu eye-tracking dat, definici TOI, exportu metrik, práci s AOI, asistovanému mapování fixací a kvalitativní inspekci záznamů. **GazePoint Analysis Professional**, ve verzi 7.0.0, byl použit pro analýzu dat v PS4. **GazePlotter** byl využit pro vizualizaci sekvencí navštívených AOI a pro kvalitativní srovnávání průběhu vizuální pozornosti pomocí „scarf plotů“. **MapLogger** byl použit pro logování uživatelských interakcí ve webových mapových aplikacích, zejména v PS5. **MishPink** sloužil jako vlastní experimentální prostředí pro PS4 a umožnil detailní logování interakcí při práci s mapami na počítači a mobilním zařízení. **CartoLogger** (představen v PS3) byl využit v kontextu logování interakcí a metodologické návaznosti na další nástroje vyvíjené na Katedře geoinformatiky. **Microsoft Excel** byl použit pro kontrolu dat, výpočty metrik, úpravu exportů a přípravu tabulkových přehledů. V rámci DC2 byly dále diskutovány a testovány nebo analyzovány také další nástroje, například **RealEye**, **WebGazer**, **ET2Spatial**, **ET2GIS** a **ET2QGIS**, které byly relevantní pro výběr a syntézu metod vhodných pro různé typy eye-tracking zařízení a interaktivních kartografických stimulů.

Postup zpracování disertační práce probíhal v několika navazujících fázích. V první fázi byla **vymezena problematika práce** podle názvu a zadání disertace. Následovalo **studium odborné literatury** a teoretických východisek, především z oblasti hodnocení použitelnosti, kognitivní kartografie, interaktivních kartografických vizualizací, HCI, UX a metody eye-tracking. Na základě tohoto studia byl formulován **hlavní cíl práce** a **tři dílčí cíle**. Tato úvodní fáze vytvořila koncepční základ pro další postup.

Druhou fází bylo **systematické zmapování stávajícího výzkumu**, které odpovídalo DC1. Nejprve byly definovány výzkumné otázky a metodologický rámec **PRISMA-ScR**. Následně proběhlo vyhledávání literatury, identifikace relevantních záznamů, screening, posouzení relevance a finální zapracování. Výsledkem této fáze byl soubor 87 studií, které byly dále analyzovány z hlediska použitých typů interaktivních kartografických vizualizací, eye-tracking metrik, úloh, participantů, praktických aplikací a výzkumných mezer. Tato fáze poskytla základní přehled o tom, jakým způsobem je eye-tracking v oblasti interaktivních geovizualizací využíván a jaké problémy zůstávají metodologicky nedořešené.

Třetí fází byl **výběr a syntéza metod**, tedy DC2. V této části byly analyzovány metriky eye-tracking, analytické nástroje, metriky použitelnosti, verbalizační metody, logování interakcí, biometrické a fyziologické metody a další doplňkové přístupy. Cílem nebylo vytvořit izolovaný katalog metod, ale posoudit jejich využitelnost pro hodnocení interaktivních kartografických vizualizací. Zvláštní důraz byl kladen na nástroje a postupy vhodné pro dynamické kartografické stimuly, u nichž se mění mapový obsah, měřítko, vrstvy nebo stav rozhraní. Výstupem této fáze byl návrh **původního metodologického schématu**, které sloužilo jako pracovní rámec pro návrh případových studií.

Čtvrtou fází byla **realizace případových studií**, tedy DC3. Případové studie byly koncipovány tak, aby postupně pokrývaly různé typy interaktivních kartografických vizualizací a různé úrovně metodologické náročnosti. **PS1** se zaměřila na interaktivní mapy v datové žurnalistice a představovala relativně stabilní typ interaktivního stimulu, u něhož bylo možné využít klasickou AOI analýzu. **PS2** pracovala s komplexnější aplikací pro porovnávání historických map a ukázala význam kombinace eye-tracking, UEQ a logování stavu aplikace. **PS3** se soustředila na metodologické problémy spojené s analýzou statického a interaktivního atlasu. **PS4** ověřovala možnosti kombinace metody eye-tracking a interakčních logů při práci s mapami na počítači a mobilním zařízení. **PS5** představovala nejkomplexnější evaluační rámec, který spojil eye-tracking, MapLogger, UEQ, doplňkový dotazník a kvalitativní inspekci záznamů při hodnocení interaktivní 3D aplikace. Všechny studie měly souhlas etické komise PřF UP.

Pátou a závěrečnou fází byla **syntéza poznatků** z DC1, DC2 a DC3. V této fázi byly propojeny výsledky systematického mapování, poznatky z výběru a syntézy metod a empirická zjištění z případových studií. Na jejich základě bylo upraveno původní metodologické schéma tak, aby lépe odpovídalo skutečně ověřeným postupům a praktickým zkušenostem ze zpracování dat. Výsledkem bylo **metodologické schéma** zaměřené zejména na analýzu dynamických 2D interaktivních kartografických vizualizací při použití stacionárního eye-trackeru. Tato syntéza následně vytvořila základ pro kapitoly Výsledky, Diskuse, Závěr a pro formulaci doporučení pro další výzkum a praxi.

Jednotlivé kroky práce byly průběžně konzultovány se školitelem, doc. RNDr. Stanislavem Popelkou, Ph.D. Dílčí metodologické a experimentální části byly dále konzultovány nebo realizovány ve spolupráci s odborníky a kolegy z Katedry geoinformatiky UP a spolupracujících institucí. Na případových studiích se podíleli zejména Mgr. Markéta Beitlová, Ph.D., Mgr. Michaela Vojtěchovská, Bc. Jonáš Košťál a Mgr. Jakub Žejdlík. Konzultace k tématům **webcam-based eye-tracking**, **RealEye** a **WebGazer** probíhaly také v návaznosti na **zahraniční stáž** na University of Salzburg.

Při přípravě textu disertační práce byly v omezeném rozsahu využity **nástroje umělé inteligence**, a to výhradně jako pomocné nástroje pro stylistickou a jazykovou podporu. Konkrétně byly použity nástroje **ChatGPT** ve verzích 4o a 5+, **Google Gemini**, **NotebookLM** a **Grammarly AI**. Tyto nástroje sloužily ke kontrole jazykové stránky textu, zpřesňování formulací, úpravě stylistiky a podpoře při práci s již autorsky vytvořeným obsahem. Nebyly využity k nahrazení odborné interpretace výsledků, tvorbě původních výzkumných závěrů ani k samostatnému generování metodologického obsahu bez autorské kontroly. Veškerý odborný obsah, metodologické postupy, experimentální rozhodnutí, interpretace výsledků i závěry představují vlastní autorskou práci.

SOUČASNÝ STAV

4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Mapy se v globálním měřítku staly jedním z nejvýznamnějších prostředků pro poskytování prostorových informací. Slouží k řešení řady zásadních problémů současného světa a představují nedílnou součást fungování lidské společnosti. Podoby, v nichž se s mapami setkáváme, se vyvíjejí paralelně s jejich rostoucí popularitou (Harrower, 2008; Roth, 2015). V posledních desetiletích zaznamenal prudký rozvoj zejména vývoj softwarových produktů, který se stal klíčovým faktorem konkurenceschopnosti a inovace v mnoha odvětvích (Ebert a De Neve, 2001). Tento vývoj je úzce spjat s narůstajícím významem informačních technologií a s potřebou zajistit nejen funkčnost, ale také **použitelnost, pozitivní uživatelskou zkušenost a efektivní orientaci uživatelů** v digitálních prostředích (Hennig a Vogler, 2016). Rozvoj mapových aplikací přináší kromě příležitostí také výzvy, které je nezbytné reflektovat při návrhu vizualizací a uživatelských rozhraní. V této souvislosti se v následujícím textu používá pojem **interaktivní mapa**, jímž je zastřešena široká škála webových map, mobilních aplikací a vizualizačních platforem, které umožňují manipulaci se zobrazením podle individuálních potřeb a preferencí uživatelů. Tyto vizualizace musí být navrženy tak, aby byly intuitivní, srozumitelné a respektovaly principy percepce, kognice i sémantiky. Úkolem kartografa proto není pouze transformace geografických informací do adekvátní vizuální podoby, ale rovněž návrh rozhraní podporujícího efektivní, přirozenou a cílově orientovanou interakci. To vyžaduje hluboké porozumění nejen vizualizačním principům, ale i uživatelskému chování a kognitivním procesům.

Se vzestupem internetu a mobilních technologií se interaktivní mapy staly běžnou součástí každodenního života široké veřejnosti (Mendonça a Delazari, 2014). Tento trend vedl k výraznému nárůstu výzkumu zaměřeného na **interaktivitu a hodnocení použitelnosti kartografických vizualizací**. Na základě těchto studií vznikla doporučení týkající se toho, jak lze získávat zpětnou vazbu od uživatelů, jaké metody hodnocení použitelnosti lze aplikovat a jak kombinovat kvalitativní a kvantitativní přístupy hodnocení. Zvláštní pozornost je přitom věnována klíčovým dimenzím použitelnosti, zejména účinnosti, efektivnosti a spokojenosti.

V následujících kapitolách je současný stav řešení problematiky systematicky strukturován v souladu s tematickým vymezením disertační práce. Text je rozdělen do tří vzájemně provázaných oblastí, které reflektují její klíčové konceptuální pilíře – **Obrázek 3**.



Obrázek 3: Rozdělení současného stavu řešené problematiky do tří tematických pilířů.

V rámci každé z těchto oblastí jsou postupně představeny teoretické přístupy, terminologické vymezení, metodologická východiska i dosavadní empirické poznatky relevantní pro řešenou problematiku. Struktura kapitol tak vytváří systematický rámec pro následné formulování výzkumných otázek a metodického postupu disertační práce.

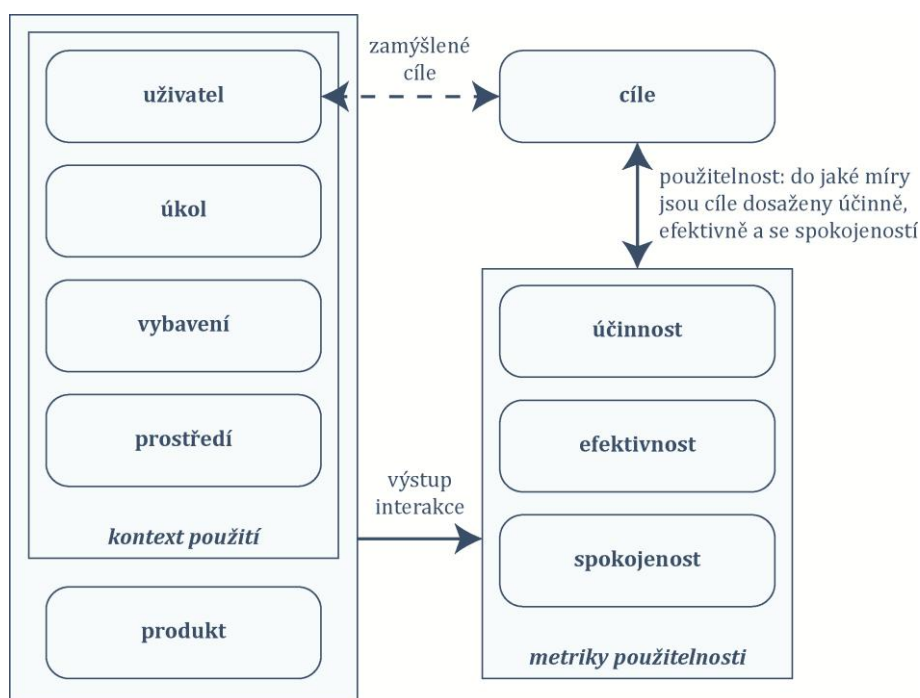
4.1 Hodnocení použitelnosti

Hodnocení použitelnosti představuje v kontextu této disertační práce jeden ze stěžejních teoretických i metodologických pilířů. Interaktivní kartografické vizualizace nejsou pouze grafickými výtvary, ale komplexními softwarovými systémy, jejichž kvalita je určována nejen správností dat a kartografickým zpracováním, ale především tím, jak efektivně a srozumitelně podporují uživatele při řešení konkrétních úloh. Pojem **použitelnost** (angl. *usability*, dříve též „*quality in use*“) proto v této práci není chápán jako dílčí vlastnost rozhraní, ale jako vícerozměrný konstrukt propojující teorii, návrh a empirické ověřování.

4.1.1 Vymezení hodnocení použitelnosti

Historicky byla použitelnost definována jako **faktor kvality softwaru**. McCall a kol. (1977) ji charakterizovali jako „úsilí potřebné k naučení se, používání, připravování vstupu a interpretaci výstupu programu“. Tato definice odpovídá dobře, kdy koncoví uživatelé nebyli v tak bezprostředním kontaktu se softwarem jako dnes (Fitzpatrick a Higgins, 1998). S postupným rozvojem interaktivních systémů se však pojetí použitelnosti rozšířilo a začalo více akcentovat samotného uživatele a kontext jeho práce.

Současná norma **ISO/IEC 9241-11 (Obrázek 4)** vymezuje použitelnost jako „míru, do jaké je produkt schopen být používán určitými uživateli k dosažení požadovaných cílů účinně, efektivně a uspokojivě, ve specifickém kontextu použití“ (ISO, 2018). Tato formulace jednoznačně zdůrazňuje tři základní pilíře použitelnosti – **účinnost** (*effectiveness*), **efektivnost** (*efficiency*) a **spokojenost** (*satisfaction*) – a zároveň podtrhuje význam konkrétního kontextu použití. Oproti tomu norma **ISO/IEC 9126-1** chápe použitelnost jako „sadu atributů, které mají vliv na úsilí nutné k užití a na individuální hodnocení tohoto užití stanovenými a implicitními skupinami uživatelů“ (ISO, 2001). Zatímco druhá z uvedených norem zdůrazňuje **atributy produktu**, první explicitně zahrnuje **výkon uživatele** i jeho **subjektivní hodnocení**.



Obrázek 4: Kontext použitelnosti podle normy ISO/IEC 9241-11.

Použitelnost je dnes považována za jeden z klíčových ukazatelů **kvality** softwarového produktu (Komárková, 2008) a její studium spadá do oblasti *human-computer interaction* (HCI). Nejde tedy pouze o estetiku rozhraní, ale o komplexní pohled na interakci člověk-počítač, zahrnující potřeby uživatelů, charakter úloh, technické prostředí i širší sociokulturní kontext (Fitzpatrick a Higgins, 1998).

Z teoretického hlediska je významná dekompozice použitelnosti podle Nielsena (1994), který vymezuje pět aspektů: (I) **naučitelnost**, (II) **efektivnost**, (III) **zapamatovatelnost**, (IV) **chybovost** a (V) **spokojenost**. První čtyři složky úzce souvisejí s produktivitou práce uživatele, zatímco spokojenost reflektuje jeho subjektivní zkušenost a celkový dojem z rozhraní. V kontextu interaktivních map je právě spokojenost důležitá pro jejich přijetí a dlouhodobé používání (Roth a kol., 2015b).

Z hlediska normy ISO/IEC 9241-11 lze použitelnost operacionalizovat prostřednictvím tří základních metrik použitelnosti (pilířů):

- ↳ **Účinnost** (*effectiveness*) – vztahuje se k míře, v jaké uživatel dosahuje stanovených cílů, zejména z hlediska přesnosti a úplnosti řešení. Typickými metrikami jsou procento úspěšně splněných úkolů či míra odchylek od správného řešení.
- ↳ **Efektivnost** (*efficiency*) – vyjadřuje poměr mezi dosaženými výsledky a vynaloženými zdroji (čas, mentální úsilí, finanční náklady). Může být měřena například časem potřebným ke splnění úkolu nebo počtem úloh splněných za jednotku času.
- ↳ **Spokojenost** (*satisfaction*) – odráží míru komfortu a subjektivního hodnocení uživatele, obvykle prostřednictvím hodnotících škál, četnosti dobrovolného používání nebo výskytu stížností.

V mapově orientovaném výzkumu se *účinnost* typicky vztahuje k přesnosti a úplnosti řešení mapové úlohy, *efektivnost* k času učení a času dokončení úlohy a *spokojenost* k preferencím

uživatelé a jeho komfortu při práci s rozhraním (Çöltekin a kol., 2009). Tyto dimenze však u interaktivních map přesahují pouhé porozumění znakům v mapě. Zahrnují také **objevitelnost** ovládacích prvků, **srozumitelnost** aktuálního stavu systému, **toleranci chyb** (např. návrat z nechtěné změny režimu) a **čitelnost zpětné vazby** při načítání či chybějících datech (Roth a kol., 2015b).

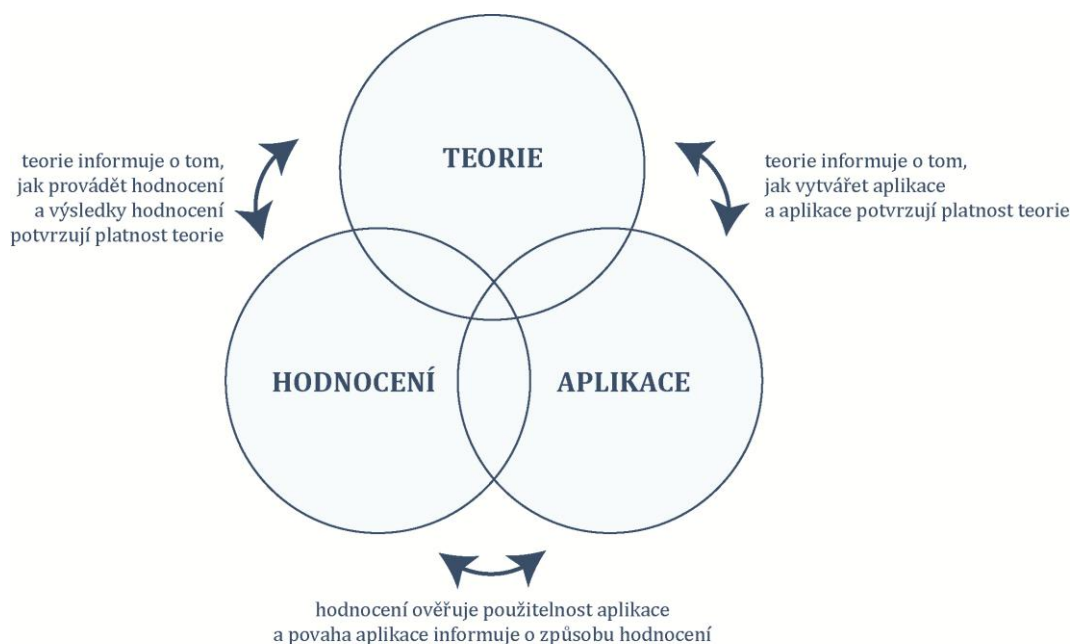
V prostředí mapově orientovaného řešení problémů je však typické, že uživatelé věnují většinu pozornosti mapovému oknu. To ale zvyšuje riziko, že méně nápadné ovládací prvky zůstanou přehlédnuty. Objektivnost a dostupnost prvků uživatelského rozhraní se tak stávají klíčovou součástí použitelnosti, nikoli pouhou estetickou otázkou (Roth a kol., 2015b).

Použitelnost je nutno chápat jako kontextově podmíněnou. Uživatelé map obecně netvoří homogenní skupinu – liší se zkušenostmi, odborností, mapovou gramotností i cíli práce (Beitlova a kol., 2020; Szigeti-Pap a kol., 2023). Z tohoto důvodu je vhodné rozlišovat mezi univerzální a situační použitelností (Degbelo a kol., 2019; Hertzum, 2010).

Univerzální použitelnost hodnotí, nakolik je mapa obecně přehledná, srozumitelná a použitelná pro široké spektrum uživatelů. **Situační použitelnost** se naopak zaměřuje na konkrétní úkol, prostředí a charakteristiky uživatele. Toto rozlišení je možné demonstrovat na relevantním příkladu u historických mapových portálů, kde úspěšné časové porovnávání mezi původním a aktuálním stavem vyžaduje kombinaci kartografické interpretace, lokální znalosti a plánování použití dané interakce (Justová a Cajthaml, 2023).

Pokud návrh rozhraní přidává zbytečnou komplexitu – například příliš mnoho možností v uživatelském rozhraní nebo nejednoznačné pojmenování popisků – dochází ke zvýšení vnější kognitivní zátěže na uživatele a ke snížení kapacity dostupné pro samotné prostorově-časové uvažování (Faudzi a kol., 2024).

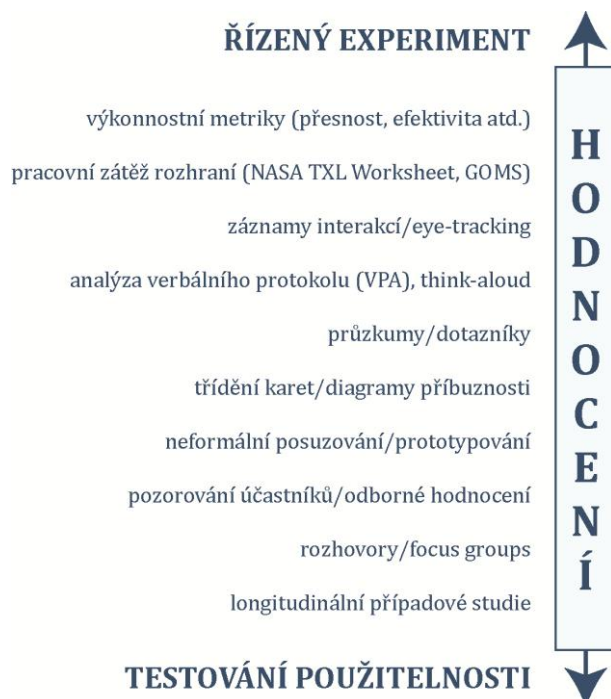
V prostředí webové kartografie nelze hodnocení použitelnosti redukovat na měření výkonu. Roth a Harrower (2008) jej popisují jako součást **tříčlenného validačního systému** propojujícího teorii, implementovanou aplikaci a empirické ověřování (Obrázek 5). Evaluace zde slouží nejen k identifikaci problémů, ale i k ověřování teoretických předpokladů o tom, jak uživatelé mapy vnímají a používají.



Obrázek 5: Třídílný validační systém ve webové kartografii podle Rotha a Harrowera (2008).

Tento přístup, zejména z hlediska povahy aplikace, odpovídá širšímu pojetí evaluace jako procesu, který propojuje to, co uživatelé deklarují, s tím, co skutečně dělají. Například dotazníkové nástroje zachycují **vnímanou použitelnost** (Díaz-Oreiro a kol., 2019), zatímco behaviorální data – výsledky úloh, časy řešení, klikání myši či vizuální pozornost – odhalují **interakční problémy**, které si uživatelé nemusí uvědomovat (Vizcarra a kol., 2026). Kombinace metod je proto v oblasti interaktivních map považována za vhodnější než spoléhání na jediný přístup (Çöltekin a kol., 2009).

Roth a Harrower (2008) upozorňují, že mezi řízeným experimentem a testováním použitelnosti neexistuje ostrá hranice, ale spíše **metodologické kontinuum** (Obrázek 6). Metody bližší řízenému experimentu pracují s vysokou mírou kontroly, standardizovanými úlohami a důrazem na kvantifikovatelné ukazatele výkonu. Přístupy bližší testování použitelnosti jsou více kontextově citlivé, zaměřené na konkrétní aplikaci a orientované na identifikaci návrhových problémů.



Obrázek 6: Kontinuum metod hodnocení s řízeným experimentem a testováním použitelnosti podle Rotha a Harrowera (2008).

Toto kontinuum zároveň odráží posun od sumativního k formativnímu hodnocení. **Sumativní hodnocení** poskytuje celkový obraz a umožňuje srovnání mezi systémy. **Formativní hodnocení** je opakované a zaměřené na zlepšování návrhu během vývoje (Fuhrmann a kol., 2005; Krug, 2013).

Velikost vzorku participantů závisí na cíli studie. Menší vzorky mohou být dostatečné pro odhalení hlavních problémů v iterativním designu, zatímco robustní kvantitativní generalizace vyžadují větší počet účastníků (Alroobaea a Mayhew, 2014; Broekhuis a kol., 2021; Hwang a Salvendy, 2010; Nielsen, 2001).

Je však třeba zdůraznit, že v oblasti webových map dosud neexistuje konsolidovaný soubor univerzálních pokynů pro návrh experimentů (Kray a kol., 2017; Roth, 2013a). Studie jsou často vysoce kontextově specifické a jejich výsledky v praxi slouží primárně ke zlepšení konkrétní aplikace.

Součástí problematiky hodnocení použitelnosti je i dlouhodobá aktivita *ICA Commission on Cognitive Issues in Geographic Information Visualization*, která systematicky propojuje kognitivní výzkum a návrh grafických informačních vizualizací.

V tomto kontextu je vhodné rozlišovat mezi obecným kognitivním testováním a funkčním testováním. **Obecné kognitivní testování** je orientováno primárně na základní výzkum. Jeho cílem je ověřovat teoretické předpoklady – například vliv grafických proměnných, způsobu zobrazení dat, barevnosti, hierarchie vizuálních prvků či konkrétního typu interakce na porozumění, paměť nebo rozhodovací proces. Takové studie se typicky přibližují řízenému experimentu v užším slova smyslu, kdy pracují s kontrolovanými podmínkami, manipulují s nezávislými proměnnými a sledují jejich vliv na výkon nebo chování uživatelů. Výsledky mají

obecnější ambici – přispět k formulaci principů návrhu a k rozvoji teorie kartografické komunikace.

Oproti tomu **funkční testování** představuje aplikačně orientovaný přístup s vysokou praktickou hodnotou. Zaměřuje se zpravidla na konkrétní aplikaci nebo na porovnání dvou (či více) konkrétních řešení z hlediska jejich uživatelské přívětivosti, efektivnosti a spokojenosti uživatelů. Cílem není primárně testovat obecnou teorii grafických proměnných, ale zjistit, která z implementovaných variant lépe podporuje řešení daných úloh v daném kontextu. Funkční testování je proto často úzce spojeno s formativním hodnocením a iterativním vývojem, jak bylo diskutováno výše (Fuhrmann a kol., 2005; Krug, 2013).

Toto rozlišení je důležité i z hlediska interpretace výsledků. Zatímco obecné kognitivní experimenty usilují o vyšší míru generalizovatelnosti a teoretického přínosu, funkční testování je více kontextově specifické a jeho závěry jsou pevně svázány s konkrétní aplikací, uživatelskou skupinou a scénářem použití (Kray a kol., 2017; Roth, 2013a). V praxi se však oba přístupy nepohybují odděleně, ale tvoří spíše kontinuum (Roth a Harrower, 2008), kdy i funkční testování může generovat poznatky s širší implikací pro návrh mapových rozhraní a naopak experimentálně orientované studie často využívají reálné mapové aplikace jako výzkumný materiál.

V rámci této disertační práce je toto rozlišení reflektováno vědomě. Přestože jsou citovány i práce zaměřené na základní výzkum (např. studie zkoumající vliv vizuálních a interakčních faktorů na kognitivní procesy), empirická část práce je primárně koncipována jako funkční testování konkrétních interaktivních kartografických vizualizací. Cílem je tedy nejen přispět k diskusi o obecné použitelnosti interaktivních map, ale především posoudit a zlepšit konkrétní implementace v reálném kontextu jejich využití. Tím se práce nachází na aplikačně orientované části metodologického kontinua, avšak současně se opírá o teoretické poznatky kognitivní kartografie a HCI.

4.1.2 Uživatelsky zaměřený design

Součástí hodnocení použitelnosti je i **širší návrhový rámec**, v němž jsou mapové aplikace vytvářeny. Uživatelsky zaměřený design (*User-Centred Design*, UCD) vychází z předpokladu, že kvalita digitální mapy není dána pouze technickou správností nebo grafickou úpravou, ale především tím, do jaké míry respektuje potřeby, schopnosti a kontext použití konkrétních uživatelů.

S rozvojem digitálních technologií se tradiční kartografické reprezentace přesunuly na **obrazovky různých zařízení** a uživatelé s nimi přímo interagují prostřednictvím navržených rozhraní (Mendonça a Delazari, 2014).

Porozumění **potřebám** a **očekáváním** koncového uživatele je proto zásadní pro efektivní návrh mapové aplikace (Cooper a Reimann, 2003). Čím lépe tvůrce mapy zná cílovou skupinu, její úlohy a pracovní prostředí, tím vyšší je pravděpodobnost, že výsledná mapa bude srozumitelná a použitelná (Cartwright a kol., 2001; Slocum a kol., 2001).

Tvorba map je spojena jak s **technologickými**, tak **netecnologickými aspekty** (Vondrakova, 2013). Z pohledu uživatele jsou klíčové zejména aspekty čitelnosti, srozumitelnosti a kvality uživatelského rozhraní (Olsson a kol., 2011). Zohlednění těchto faktorů přispívá k vytváření kvalitnějších map a umožňuje kartografům lépe reflektovat důsledky návrhových rozhodnutí

(Vondrakova, 2013). Hodnocení map z perspektivy uživatele tak představuje nezbytný předpoklad smysluplného návrhu.

Interaktivita je dnes standardní součástí webových kartografických produktů (Cybulski a Horbinski, 2020). Přesto jsou preference, intuice a mentální modely uživatelů při návrhu mapových rozhraní často podceňovány (Mendonça a Delazari, 2014). Mezinárodní kartografická asociace ICA (2010)¹ proto zdůrazňuje význam systematického kvalitativního i kvantitativního testování použitelnosti různých typů map a vizualizací. Návrh map by měl vycházet z principů uživatelsky zaměřeného designu a z dobré znalosti problematiky použitelnosti (Konečný a kol., 2011).

V digitálním prostředí, kde jsou mapy dostupné široké veřejnosti, je navíc nutné zohledňovat **heterogenitu uživatelských skupin**. Způsob prezentace informací by měl reflektovat rozdíly v odbornosti, věku, kulturním zázemí nebo případných omezeních uživatelů (Bandrova a Nikolova, 2005). Charakteristiky uživatelů významně ovlivňují jejich schopnost interpretovat mapy a úspěšnost řešení mapových úloh (Kail, 1997; Slocum a kol., 2001).

Uživatelsky zaměřený design nepředstavuje pouze sběr názorů na vzhled nebo funkce systému. Jde o systematické zapojení uživatelů do vybraných fází vývoje produktu tak, aby návrhová rozhodnutí byla informovaná a opřená o reálné potřeby a scénáře použití (Hennig a Vogler, 2016). Zapojení uživatelů do procesu návrhu zvyšuje pravděpodobnost dosažení vyšší účinnosti a celkové kvality produktu (Ooms a kol., 2012a).

V kontextu interaktivních map je důležité si uvědomit, že:

„people use the map interface, but what they experience
are interactions with the map“ (Roth, 2012).

Lidé používají rozhraní mapy, ale to, co zažívají, jsou interakce s mapou.

Návrh rozhraní a interakční logiky proto zásadně ovlivňuje celkový **uživatelský zážitek**. Nadměrná míra interaktivity může vést ke kognitivnímu **přetížení**, snížení **spokojenosti** a méně efektivnímu **rozhodování** (López-Ornelas a kol., 2013; Neset a kol., 2016; Retchless a kol., 2021; Vincent a kol., 2019). Jedním z doporučovaných řešení je vrstvení rozhraní, kdy je uživateli nejprve nabídnuta jednodušší varianta a pokročilé funkce jsou dostupné až v případě potřeby (Roth, 2015; Roth a Harrower, 2008; Shneiderman, 2002).

V literatuře se rozlišují související pojmy **inženýrství použitelnosti** (*Usability Engineering*, UE), **uživatelsky zaměřený design** (UCD) a **uživatelský zážitek** (UX). Zatímco metody použitelnosti jsou primárně orientovány na zlepšení lidského výkonu při plnění úloh, přístupy UX se více zaměřují na subjektivní prožitek, potěšení a emoční složku interakce (Bevan, 2009; Degbelo a kol., 2019). Uživatelská zkušenost přesahuje technologický rámec a zahrnuje například estetiku, radost, důvěru či pocit komfortu (Bargas-Avila a Hornbæk, 2011). Metody UX mohou zahrnovat dotazníky, rozhovory, videozáznamy, poznámky či další kvalitativní nástroje (Bargas-Avila a Hornbæk, 2011).

¹ **UX: Designing the User Experience:** A Commission of the International Cartographic Association [online]. ICA [cit. 2023-06-02]. Dostupné z: <https://use.icaci.org/>

Součástí uživatelsky zaměřeného přístupu je rovněž koncept **přístupnosti** (*accessibility*), tedy snaha zajistit, aby webové mapy byly použitelné pro osoby s různými schopnostmi a omezeními (Kraak a kol., 2020). To zahrnuje například **zohlednění potřeb osob** se zrakovým či pohybovým omezením a podporu různých způsobů interakce.

Uživatelsky zaměřený design tak představuje praktický rámec, který propojuje teoretické poznatky o použitelnosti s konkrétními návrhovými rozhodnutími. V kontextu této disertační práce je tento přístup chápán jako přirozené metodologické východisko, tedy hodnocení použitelnosti není izolovaným aktem měření, ale součástí širšího cyklu návrhu, testování a postupného zpřesňování interaktivních kartografických vizualizací s ohledem na jejich reálné uživatele.

4.1.3 Kognitivní procesy uživatele

Hodnocení použitelnosti interaktivních map nelze redukovat pouze na měření výkonu nebo spokojenosti. Mapové rozhraní je zpracováváno lidským kognitivním systémem, jehož kapacita je omezená. Porozumění základním kognitivním procesům je proto důležité jak pro návrh experimentu, tak pro interpretaci jeho výsledků.

Jedním z relevantních teoretických rámců je **teorie kognitivní zátěže** (Plass a kol., 2010; Sweller, 2011). Ta vychází z rozlišení mezi **pracovní pamětí** a **dlouhodobou pamětí**. Informace přijaté prostřednictvím smyslů jsou zpracovávány v pracovní paměti, jejíž kapacita je omezená. Pro trvalé uchování musí být informace integrována do dlouhodobé paměti, kde se propojuje s již existujícími znalostmi. Tento model vysvětluje, proč může příliš složité rozhraní nebo nadbytečná interaktivita negativně ovlivnit výkon uživatele – pracovní paměť je jednoduše přetížena.

Teorie kognitivní zátěže rozlišuje tři typy zátěže²:

- ↳ **Vlastní** (*intrinsic*) – souvisí s inherentní složitostí úlohy nebo informace.
- ↳ **Nadbytečná** (*extraneous*) – je způsobena nevhodným návrhem designu, nepřehledností nebo rušivými prvky.
- ↳ **Užitečná** (*germane*) – je spojena s procesem porozumění, učením a pochopením principů interaktivní mapy.

Z hlediska návrhu interaktivních map je klíčové **minimalizovat nadbytečnou zátěž**, aniž by byla redukována informační hodnota samotného úkolu. Pokud je rozhraní přehlcené, nejednoznačné nebo vyžaduje zbytečné kroky, zvyšuje se **nadbytečná zátěž** a snižuje se kapacita dostupná pro samotné prostorové či časové uvažování. Tato problematika byla diskutována například v souvislosti s animovanými mapami (Bunch a Lloyd, 2006), kde může dynamika prezentace sama o sobě představovat dodatečnou kognitivní zátěž.

V rámci návrhu experimentu je proto důležité zohlednit i **kognitivní náročnost samotných úloh**. Příliš složitý úkol může přetížit pracovní paměť a zkreslit výsledky měření, zatímco příliš jednoduchý úkol může být řešen automaticky bez hlubšího zapojení (Charters, 2003). Užitečný

² **Typy kognitivní zátěže** nemají v českém odborném prostředí jednotně ustálený překlad. V literatuře se lze setkat s různými překladovými variantami, přičemž neexistuje autoritativní terminologický zdroj, který by jejich užívání standardizoval. U některých termínů (zejména *germane cognitive load*) se objevují i nepřesné či zavádějící překlady vyplývající z doslovného převodu z angličtiny. V této práci jsou proto použity překlady „vlastní“, „nadbytečná“ a „užitečná“ kognitivní zátěž, které podle autora nejlépe vystihují funkční význam jednotlivých kategorií v kontextu návrhu a hodnocení interaktivních map.

rámec pro klasifikaci náročnosti úloh nabízí **taxonomie kognitivních procesů** podle [Andersona a Krathwohla \(2001\)](#), která rozlišuje úrovně od zapamatování přes porozumění a aplikaci až po analýzu, syntézu a hodnocení.

Empirické studie ukazují, že náročnější kognitivní operace (např. analýza) vyžadují delší čas a mohou být citlivější na typ vizualizace. Například při porovnání animovaných a interaktivních map bylo zjištěno, že animace může **zvyšovat vnější nadbytečnou zátěž**, zejména v kombinaci s úlohami vyšší složitosti ([Khalil a kol., 2005](#); [Saint-Marc a kol., 2017](#)). To potvrzuje, že typ vizualizace a typ úkolu nelze posuzovat odděleně.

Pro subjektivní hodnocení zátěže je často využíván nástroj **NASA-TLX**, který měří mentální, fyzickou a časovou náročnost, subjektivně vnímaný výkon, úsilí a frustraci. Tento index umožňuje zachytit, jak uživatel úkol prožíval, nikoli pouze jaký výkon podal. V kontextu hodnocení map může být užitečný zejména při porovnávání různých variant rozhraní nebo interakčních mechanismů.

Dalším faktorem jsou **individuální rozdíly** mezi uživateli. Čtenáři map nejsou homogenní skupinou; liší se věkem, zkušenostmi, odborností i předchozí znalostí tématu ([Ooms a kol., 2012a](#); [Slocum a kol., 2001](#)). Rozlišování mezi **experty a laiky** je proto v mapových experimentech metodologicky relevantní ([Nielsen, 1994](#)). Koncept kognitivního stylu, chápaný jako relativně stabilní preference v přístupu ke zpracování informací ([Riding a Sadler-Smith, 1997](#)), může teoreticky ovlivňovat interpretaci map. Nicméně vzhledem k metodologické nejednotnosti a probíhajícím diskusím v oblasti psychologie je vhodné tento koncept v rámci této práce zmínit pouze rámcově a nepřikládat mu větší explanační váhu.

Z uvedeného vyplývá, že hodnocení použitelnosti interaktivních map vyžaduje **interdisciplinární přístup**. Kartografie se zde přirozeně propojuje s kognitivní psychologií, protože interpretace mapy je výsledkem interakce mezi vizuálním podnětem a mentálními procesy uživatele ([Konečný a kol., 2011](#)). Cílem této práce však není detailní analýza kognitivních stylů či komplexní modelování mentálních procesů, ale zohlednění základních principů kognitivního fungování člověka při návrhu úloh, interpretaci výsledků a hodnocení interaktivních kartografických vizualizací.

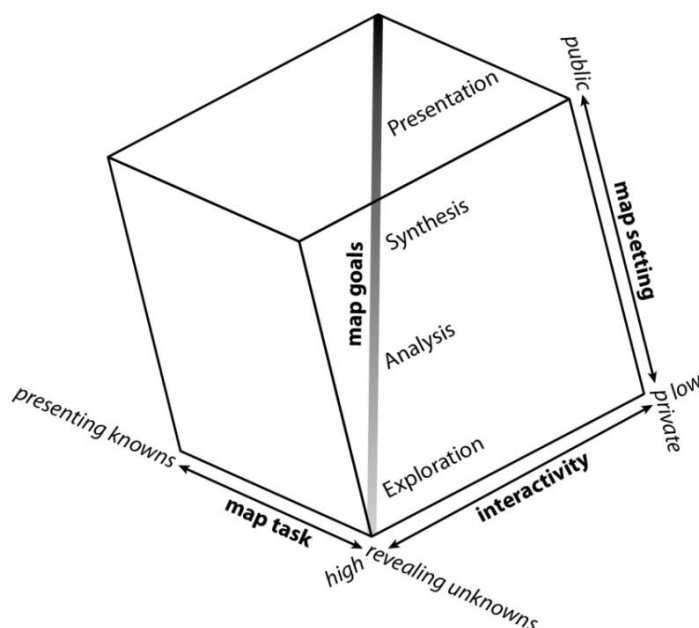
4.2 Interaktivní kartografické vizualizace

Rozvoj webových a interaktivních map představuje zásadní proměnu kartografie v kontextu digitálních technologií. Internetové prostředí umožnilo nejen masovou distribuci mapových produktů, ale především jejich transformaci z pasivních statických zobrazení na **dynamické, interaktivní a uživatelsky ovlivnitelné** vizualizace ([Sack a Roth, 2017](#)). Jejich masové rozšíření dokládá například skutečnost, že *Apple Maps* zaznamenaly již v roce 2015 více než pět miliard přístupů týdně ([Jesdanun, 2015](#)). Podobně i další významní producenti map, jako *The New York Times* nebo *U.S. Geological Survey*, začali své kartografické produkty publikovat prostřednictvím interaktivních webových aplikací ([Sack a Roth, 2017](#)). Mapy publikované prostřednictvím webových aplikací se staly běžnou součástí každodenního života – od navigačních systémů přes datovou žurnalistiku až po odborné analytické portály. Internet se tak stal nejen distribuční platformou, ale i prostředím, které redefinovalo samotnou podstatu mapy ([Peterson, 2003](#); [Popelka a kol., 2019b](#)).

Tento vývoj však nelze chápat pouze jako technologickou inovaci. Interaktivní kartografické vizualizace jsou výsledkem hlubší paradigmatické změny, která byla teoreticky

předznamenána již v 90. letech v rámci konceptu geovizualizace a tzv. **paradigmatu užití mapy** (MacEachren a Taylor, 1994).

MacEachren (1994) redefinoval postavení mapy v rámci kartografie prostřednictvím konceptu **vizualizace v moderní kartografii** (*Visualization in Modern Cartography*) a zejména modelu označovaného jako „*cartography cubed*“ (**Cartography³**), resp. prostor užití mapy (*map use space*) – **Obrázek 7**. Tento model představuje odklon od tradičního komunikačního pojetí mapy směrem k jejímu chápání jako nástroje poznávání.



Obrázek 7: Rámec Cartography³ definuje prostor použití mapy na základě úkolů, které mapa podporuje, jejího nastavení a úrovně interaktivity (zdroj: Sack (2018), na základě MacEachren (1994) a MacEachren a Kraak (1997)).

Zatímco klasický komunikační model kartografie vychází z předpokladu, že mapa slouží primárně k předání již známé informace od autora k uživateli, MacEachren (1994) vymezuje vizualizaci jako proces podporující odhalování neznámého prostřednictvím **vizuálního myšlení**. Mapa zde není pouze médiem komunikace, ale nástrojem **explorace** a **analytického uvažování**.

Prostor užití mapy (*map use space*) od MacEachrena (1994) je definován třemi kontinui:

- ↳ **soukromé – veřejné užití** (*private – public use*),
- ↳ **odhalování** neznámého – **prezentace** známého (*revealing unknowns – presenting knowns*),
- ↳ **vysoká – nízká míra** interakce (*high – low interaction*).

Geografická vizualizace (*Geographic Visualization, GVIS*) je podle něj charakteristická kombinací soukromého užití, odhalování neznámého a vysoké míry interakce. Naproti tomu tradiční kartografická komunikace odpovídá veřejnému užití, prezentaci známého a nízké interaktivitě.

V tomto rámci může mapa plnit různé funkce:

- ↳ jako **nástroj explorace** dat a podpory **vizuálního myšlení** (*visual thinking tool*),
- ↳ jako prostředek **analytického ověřování** a **syntézy poznatků**,
- ↳ nebo jako **komunikační nástroj** určený k prezentaci výsledků širšímu publiku (*visual communication*).

Interaktivní mapy typicky posilují právě první z uvedených rovin, tedy explorativní a analytické užití. Uživatel zde nevystupuje pouze jako pasivní příjemce sdělení, ale jako **aktivní účastník** procesu poznávání, který prostřednictvím interakcí (např. změny měřítka, filtrace, reorganizace dat) podporuje vlastní konstrukci poznatků.

Geovizualizaci lze proto chápat jako koncepční propojení kartografie a širší oblasti vizualizace dat. Důraz je kladen zejména na:

- ↳ vysokou míru **interaktivity** (*human-map interaction*),
- ↳ možnost práce s **vícenásobnými reprezentacemi dat**,
- ↳ podporu **vizuálního myšlení** a **analytického procesu**,
- ↳ **iterativní charakter** práce s vizualizací v průběhu výzkumného procesu (*exploration – confirmation – synthesis – presentation*).

Současné interaktivní mapové portály a analytické aplikace lze interpretovat jako praktické naplnění tohoto modelu užití mapy. Je však důležité zdůraznit, že samotná přítomnost interaktivity nestačí k tomu, aby bylo možné mapu označit za nástroj geovizualizace; rozhodující je kombinace vysoké interaktivity, soukromého analytického užití a zaměření na odhalování dosud neznámých struktur v datech, jak výslovně uvádí MacEachren (1994).

Ve srovnání s tradičními tištěnými mapami představují dynamické a interaktivní mapy **pokročilejší formu vizualizace** a reprezentace dat (Dong a kol., 2012). Webové mapy jsou často volně dostupné a kromě samotného kartografického obsahu poskytují i doplňkové nástroje a služby (Nivala a kol., 2008). Nejrozšířenější a nejčastěji využívané mapové produkty jsou dnes ty, které jsou dostupné online a určené široké veřejnosti – typicky *Google Maps*, *Apple Maps* a *OpenStreetMap* (Keskin a kol., 2023). Interaktivita těchto map uživatelům umožňuje měnit měřítko, aplikovat filtry, zobrazovat nebo skrývat vrstvy a tím přizpůsobit vizualizaci svým potřebám (MacEachren, 1994; Retchless a kol., 2021; Roth, 2012). Vysoce interaktivní mapy podporují také pokročilejší možnosti **personalizace a filtrování** obsahu, což přispívá k lepší uživatelské orientaci a k přesnějšímu naplnění individuálních zájmů (Bohman a kol., 2015; Johansson a kol., 2017; Retchless a kol., 2021).

Prudký růst webových mapových platforem a rozvoj technologií však zároveň představuje významnou výzvu. Tvůrci interaktivních map musí neustále reagovat na rychlý technologický vývoj digitální doby a na rostoucí očekávání uživatelů (Dong a kol., 2014a; Roth a kol., 2015a). Moderní uživatelé internetu totiž často předpokládají, že jakákoli vizuální informace na obrazovce **bude interaktivní a reagující na jejich vstup** (Mendonça a Delazari, 2012). Navzdory popularitě webových map jsou tyto produkty v řadě aspektů limitovány – ať už použitými nástroji, technologiemi či procesem návrhu (Crampton a Krygier, 2015; Rezk a Hendawy, 2023).

Další problém představuje nedostatek obecně přijímaných **designových směrnic** pro webové mapy. Ačkoli existuje dlouhá tradice kartografických pravidel pro tvorbu statických map, pro návrh interaktivních webových vizualizací stále chybí univerzálně uznávané standardy

(Cartwright a kol., 2001; Mendonça a Delazari, 2012; Nivala, 2007). Tvorba webových map je navíc specifická ve srovnání s návrhem běžných webových stránek (Cartwright a kol., 2001; Peterson, 2007) a přináší řadu výzev souvisejících s různorodostí uživatelských skupin. Webové mapy totiž využívají lidé s odlišnými zkušenostmi, znalostmi i potřebami, a proto nemusí vždy splnit očekávání všech uživatelů (Nivala a kol., 2008).

4.2.1 Vymezení pojmu „interaktivní kartografická vizualizace“ (IKV)

V odborné i aplikační praxi se pro současné mapové výstupy v digitálním prostředí používá více částečně se překrývajících označení (např. webová mapa, digitální mapa, interaktivní mapa, dynamická mapa, geovizualizace, kartografická vizualizace). To není jen stylistický problém, ale problém konceptuální, protože jednotlivé termíny často akcentují odlišné aspekty téhož artefaktu (médiu distribuce, datovou/technickou architekturu, míru časové proměnlivosti, míru uživatelské interakce, nebo účel – analýza versus komunikace). V důsledku může být nejasné, zda autoři mluví o tomtéž, nebo o různých třídách mapových produktů. Podobnou nejednoznačnost ostatně explicitně připouští i terminologické a encyklopedické zdroje, když konstatují, že pojem geovizualizace je používán nekonzistentně (může označovat proces, výstup, techniku i disciplínu) (Cöltekin a kol., 2018).

Pro účely disertační práce zaměřené na hodnocení použitelnosti je přesné terminologické vymezení **zásadní**. Testování použitelnosti se totiž typicky váže na konkrétní interakční rozhraní a jeho chování (co uživatel vidí, co může udělat, jak systém reaguje, jak se mění vizuální stav). To předpokládá, že je jasně vymezeno, zda je předmětem hodnocení „mapa jako obraz“, „mapa jako interaktivní rozhraní“ nebo širší „mapově-orientovaná vizualizace“ (např. mapa v kombinaci s grafy a filtry v jednom rozhraní) (Roth, 2013a).

Mapa, kartografická vizualizace a geovizualizace

Základním pojmem je **mapa**. Mezinárodní kartografická asociace (ICA)³ ji definuje jako symbolizovanou reprezentaci geografické reality, která zobrazuje vybrané prvky nebo charakteristiky a je určena pro situace, kdy jsou podstatné prostorové vztahy. Tato definice je důležitá ze dvou důvodů: (i) nestanovuje médium (papír vs. displej), ale podstatu (symbolická, selektivní reprezentace pro prostorové uvažování), a (ii) zdůrazňuje roli autora při rozhodování o výběru obsahu, generalizaci a způsobu kartografického vyjádření, které přímo souvisí s kartografickou komunikací i s kognitivní zátěží čtenáře map (Lapaine a kol., 2021).

Vedle pojmu mapa se v moderní kartografii prosadilo uvažování v intencích **vizualizace** a **interakce**. Zvláště vlivné je rozlišení mezi „vizualizací“ (kde cílem je objevování neznámého) a „komunikací“ (kde cílem je sdělení známého). V rámci konceptu Cartography³ (tedy kartografická krychle) se tato opozice vyjadřuje třemi dimenzemi: soukromé vs. veřejné užití, odhalování neznámého vs. prezentace známého a nízká vs. vysoká míra interakce člověk–mapa (MacEachren, 1994; Orford a kol., 2003). Na tomto základě je **kartografická vizualizace** často vykládána jako převážně „soukromá“ aktivita podporující vizuální myšlení v prostředí s vysokou mírou interaktivity, zatímco kartografická komunikace je vykládána jako aktivita veřejná s nízkou interaktivitou (Orford a kol., 2003).

³ **Mezinárodní kartografická asociace – Mission.** International Cartographic Association [online]. Basel, Švýcarsko: International Cartographic Association, [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://icaci.org/mission/>

Příbuzným – a v anglofonní literatuře dnes dominantnějším – zastřešujícím pojmem je **geovizualizace** (*geovisualization*). Cöltekin a kol. (2018) shrnují geovizualizaci primárně jako proces interaktivního vizualizování geografické informace napříč kroky prostorové analýzy, přičemž může odkazovat i na výstupy (mapy, grafy, jejich kombinace) a související techniky. Důležitý je zde také **historický argument**, podle kterého geovizualizace vyrůstá z kartografie a posiluje roli map jako nástroje vizuálního myšlení a generování hypotéz, nikoli jen prezentace finálních výsledků.

Toto pojetí lze doplnit definicí, která přímo zdůrazňuje znalostní funkci geovizualizace: Kraak (2003) popisuje geovizualizaci jako **práci s geovizuálními zobrazeními** (mapy a provázané grafiky) umožňujícími skrze exploraci generovat hypotézy, hledat řešení a konstruovat znalost; tato činnost je typicky usnadněna interaktivním a dynamickým prostředím.

V českém, normativně orientovaném prostředí je užitečné doplnit i terminologickou definici. Slovník Terminologické komise ČÚZK⁴ vymezuje geovizualizaci jako **plánování a generování** znázornění digitálních geografických dat prostředky počítačové grafiky podle pravidel či algoritmů; doplňuje ji výčtem **typických operací** (např. přibližování a oddalování, posun mapy či překryvy vrstev). Tato definice je záměrně „operacionální“ (vázaná na soubor činností), a proto je vhodná zejména tehdy, když je cílem vymezit pozorovatelný předmět analýzy (tj. co systém umožňuje dělat).

Digitální a webová mapa

Pro odlišení „formy“ a „médiu“ je klíčové rozlišit **digitální a webový rozměr**.

Digitální mapa je v terminologickém slovníku ČÚZK⁵ definována jako **digitální záznam** obsahu a konstrukčních (případně jiných) prvků mapy, který lze vizualizovat a zpracovávat počítačovým systémem. Toto vymezení je „technologicky neutrální“ v tom smyslu, že digitální mapa může existovat mimo web (např. jako soubor v zařízení, v desktopovém GIS, v offline mobilní aplikaci), ale musí být počítačově zpracovatelným modelem mapového obsahu. K tomu Netek (2020) doplňuje, že se u digitálních map zdůrazňuje mj. dostupnost a možnost rychlé aktualizace oproti analogovým výstupům (včetně potenciálu publikovat i v krátkých cyklech či v reálném čase), a zároveň upozorňuje na specifika digitálního média pro kartografickou tvorbu a užití.

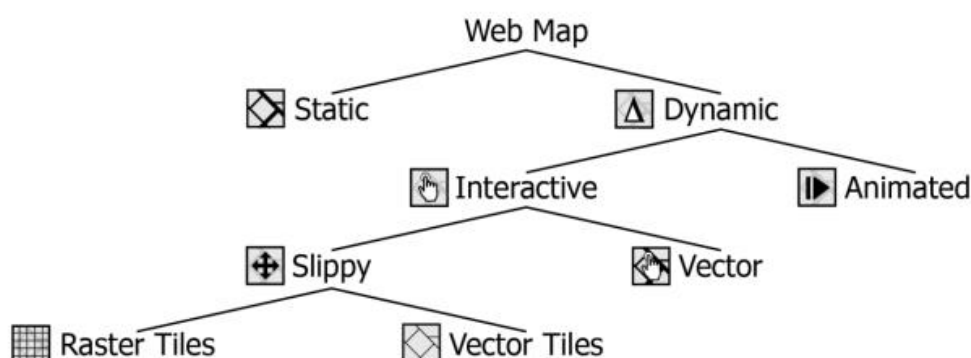
Webová mapa (*web map, web mapping*) pak akcentuje **médium distribuce – prostředí webu**. Dorman (2020) popisuje webovou mapu jako interaktivní zobrazení geografické informace ve formě webové stránky, přičemž zásadní výhodou je dostupnost (kdokoli a odkudkoli s webovým prohlížečem a připojením). Dorman (2020) současně zdůrazňuje, že webové mapy bývají „poháněné webem“ (tj. nejsou zcela samonosné a část obsahu se typicky načítá z webových zdrojů).

V odborné literatuře existuje vedle tohoto „přísnějšího“ pojetí (**webová mapa = interaktivní**) i pojetí širší, ve kterém webová mapa zahrnuje i **mapy statické**. Například Sack (Sack, 2018; Sack a Roth, 2017) definuje webovou mapu obecně jako mapu publikovanou a **zpřístupněnou**

⁴ Termín **geovizualizace**. Terminologický slovník ČÚZK [online]. VÚGTK 2005–2020, [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://slovníkczk.eu/termin.php?&tid=7141&l=geovizualizace>

⁵ Termín **digitální mapa**. Terminologický slovník ČÚZK [online]. VÚGTK 2005–2020, [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://slovníkczk.eu/termin.php?l=digitalni-mapa&tid=1047>

přes internet (obvykle jako součást webové stránky) a dále ji třídí na statické a dynamické formy – **Obrázek 8**.



Obrázek 8: Kategorizace webové mapy (zdroj: Sack (2018)).

Dále Néték (2020) rozlišuje webovou mapu jako **produkt dostupný přes WWW** a *web mapping* jako proces tvorby a používání map v rámci WWW; zároveň připouští dělení webových map na statické a interaktivní a dále zohlednění dynamiky.

Pro terminologické ukotvení vůči „procesu“ je pak užitečné rozlišit:

- ↳ „**Webové mapování**“ (*web mapping*): soustředí se primárně na návrh nebo vývoj webové mapy jako technicko-aplikačního produktu (v užším pojetí často přímo interaktivního) (Néték, 2020; Sack, 2018).
- ↳ „**Webová kartografie**“ (*web cartography*): směřuje více k vizuálnímu návrhu a teoretickým i uživatelským aspektům webových map; podle Sackova (2018) vymezení jde o vizuální design statických i dynamických webových map. Česká definice VÚGTK (2020) webovou kartografií chápá jako část kartografie zabývající se tvorbou a zpracováním map v prostředí WWW.

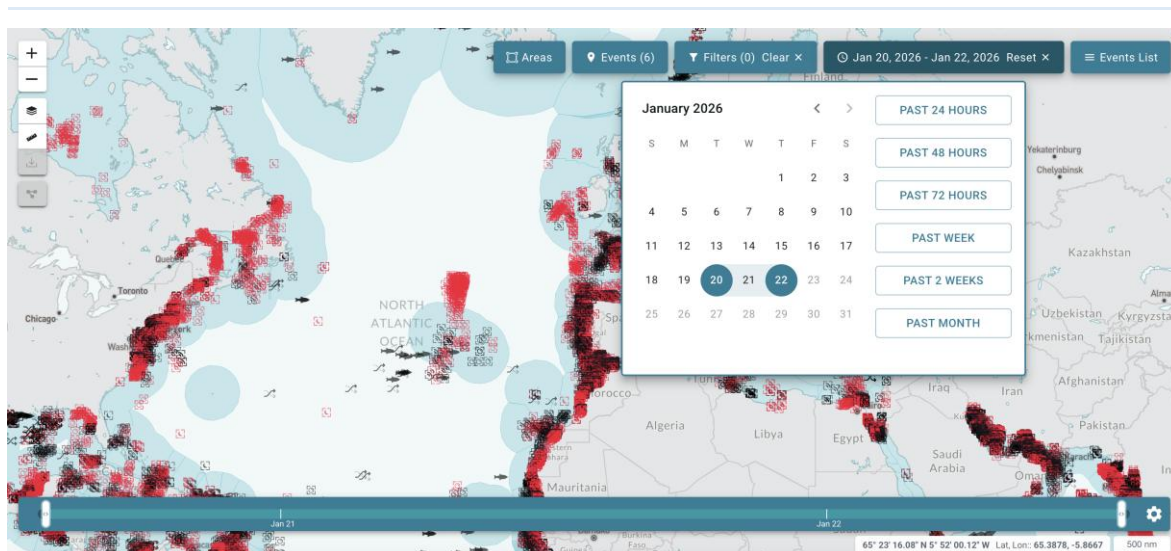
Z hlediska vymezení pojmu „interaktivní kartografická vizualizace“ je prakticky podstatné, že „webovost“ je **pouze jednou z vlastností** (médiu). Interaktivita a dynamika jsou vlastnosti jiné, které mohou, ale nemusí být s „webovostí“ svázány.

Dynamická mapa

Pojem **dynamická mapa** je v kartografické teorii typicky spojen s časovou proměnlivostí mapového obsahu. V Nétkově (2020) výkladu je dynamika chápána jako zachycení vývoje v čase a dynamické mapy jsou vymezeny jako protiklad map statických, protože mění obsah v čase; typickým příkladem jsou **mapové animace** (Anderson, 2020). Tato charakteristika odpovídá i web-mapové taxonomii, v níž jsou dynamické webové mapy definovány jako mapy měnící vzhled v průběhu prohlížení; mezi dynamické formy jsou pak řazeny animované a interaktivní webové mapy (Sack, 2018).

Důležité je však neztotožňovat dynamiku a interaktivitu. Již u animací se rozlišuje, zda je **animace neřízená** (uživatel je pouze divák) nebo **řízená** (uživatel může průběh ovlivňovat). Možnost korigovat průběh animace (např. rychlost, rozsah či počet zobrazených dat) představuje přechod k principu interaktivity (Néték, 2020; Viliš, 2013).

Z hlediska klasifikace pojmů to znamená: **„dynamická“** označuje časové chování mapového obsahu, zatímco **„interaktivní“** označuje způsob řízení změny (uživatel vs. systémem). Jedna mapa může být dynamická bez interaktivity (např. automaticky běžící animace), interaktivní bez výrazné dynamiky (např. zoom/pan nad statickými daty) nebo obojí současně (např. time-slider řízený uživatelem – **Obrázek 9**).



Obrázek 9: Příklad aplikace kombinující interaktivitu a dynamiku mapy (zdroj: Skylight (2026)).

Interaktivní mapa

Interaktivita v mapách bývá vykládána v rámci paradigmatu člověk–počítač: systém reaguje na vstupy uživatele a uživatel může ovlivňovat stav zobrazení. V kartografii je tento aspekt konceptualizován jako **kartografická interakce**. Roth (2013a) ji definuje jako **dialog mezi člověkem a mapou** zprostředkovaný výpočetním zařízením a zdůrazňuje, že jde o klíčový koncept pro výzkum interaktivních map.

V návaznosti na tento rámec lze interaktivní mapu chápat jako mapu, která umožňuje uživateli **měnit zobrazení či obsah** prostřednictvím interakčních operací (např. změna měřítky a výřezu, přepínání vrstev, identifikace prvků, vyvolání pop-up informací, filtrování či vyhledávání). Tento „operátorový“ pohled je kompatibilní jak s kartografickou teorií interakce, tak s terminologickými slovníky, které geovizualizační operace (zoom, pan apod.) vyjmenovávají jako typické činnosti v digitálních geovizualizačních rozhraních (VÚGTK, 2020). Pro vymezení předmětu použitelnosti je užitečné doplnit, že interakce není totéž co uživatelské rozhraní. **Rozhraní** je soubor prvků, které interakci umožňují (widgety, ovládací prvky), zatímco **interakce** zahrnuje i cíl uživatele a odezvu systému (tedy „dialog“). Tento rozdíl je v literatuře rozpracován v taxonomiích kartografické interakce a v úvahách o úrovních interakce (od cílů a úloh až po konkrétní operátory a vstupní zařízení) (Roth, 2012; Roth, 2013a); více je rozebráno v dalších podkapitolách, zejména ve 4.2.3.

V kontextu webových map se navíc interaktivita často považuje za „**implicitní**“ součást webové mapy (v některých definicích je webová mapa rovnou definována jako interaktivní webová stránka) (Dorman, 2020). Současně ale platí, že část literatury (a praxe) stále pracuje i s webovými mapami statickými a z tohoto důvodu je výhodné držet interaktivitu jako samostatnou vlastnost, nikoli jako automatickou součást „webovosti“ (Sack, 2018).

Pracovní vymezení pojmu „interaktivní kartografická vizualizace“ (IKV)

Na základě výše uvedených vymezení lze „interaktivní kartografickou vizualizaci“ formulovat jako pojem, který má být **dostatečně široký**, aby zahrnul různé podoby mapových interaktivních produktů, ale zároveň **dostatečně přísný**, aby zůstal kartograficky ukotvený (tj. neztotožnil se s libovolnou interaktivní vizualizací dat).

Pracovní definice „interaktivní kartografické vizualizace“ (pro účely disertační práce):

- ↳ ***Interaktivní kartografická vizualizace (IKV)** je digitální kartografický výstup (nejčastěji mapa nebo zobrazení podobné mapě), který symbolicky reprezentuje geografickou realitu a je určen k interpretaci prostorových vztahů, přičemž uživateli poskytuje kartografickou interakci – tj. možnost měnit stav zobrazení prostřednictvím vstupů a odezvy systému (dialog člověk–mapa zprostředkovaný výpočetním zařízením). Může (ale nemusí) zahrnovat dynamiku ve smyslu časové proměnlivosti obsahu.*

Tato definice je syntézou tří „nosných“ pilířů z literatury:

- ↳ **Kartografická podstata mapy** (symbolizovaná reprezentace geografické reality pro prostorové vztahy) (ICA, 2021).
- ↳ **Digitální povaha objektu** (digitální mapa jako počítačově vizualizovatelný a zpracovatelný záznam mapového obsahu) (VÚGTK, 2020).
- ↳ **Interakční charakter** (kartografická interakce jako dialog člověk–mapa zprostředkovaný zařízením) (Roth, 2013a).

Pro terminologické vztahy je pak možné explicitně uvést hierarchii a překryvy:

- ↳ **Digitální mapa** (forma) je nadřazená kategorie, která může existovat offline i online.
- ↳ **Webová mapa** (médiu) je podmnožinou digitálních map distribuovaných přes web; podle některých autorů nutně interaktivní, podle jiných může být i statická.
- ↳ **Interaktivní mapa** (interakce) je podmnožinou digitálních map, u nichž změny zobrazení vyplývají z dialogu uživatele se systémem.
- ↳ **Dynamická mapa** (časové chování) je napříč médii, a tedy se může překrývat s „webovostí“ i interaktivitou, ale není s nimi totožná.

Pro potřeby této disertační práce bude ve spojitosti s interaktivními kartografickými vizualizacemi používána zkratka **IKV**:

IKV = *interaktivní kartografická vizualizace*

V rámci této terminologické struktury je IKV vhodné chápat jako **zastřešující termín** pro takové mapové digitální výstupy, kde je **interaktivita definujícím znakem** a kde se současně předpokládá kartografická povaha reprezentace (tj. nejde primárně o „holé“ GIS rozhraní bez kartografického návrhu, ani o obecnou datovou vizualizaci bez mapové reprezentace). Toto vymezení je zároveň kompatibilní s pojetím geovizualizace jako procesu interaktivní práce s geografickou informací napříč analýzou (Cöltekin a kol., 2018), protože interaktivní kartografická vizualizace může sloužit jak k exploraci (geovizualizace), tak k prezentaci (kartografická komunikace), přičemž míra interakce a účel užití určují, kam se konkrétní artefakt na kontinuu „vizualizace–komunikace“ řadí (MacEachren, 1994).

Z praktického hlediska (pro další části disertační práce) přináší uvedené vymezení dvě přímé konsekvence: (i) předmětem hodnocení je **konkrétní kartografické rozhraní a jeho interakční možnosti** (nikoli jen statický mapový obraz), a (ii) do operacionalizace

použitelnosti je nutné zahrnout nejen obsah, náplň a čitelnost mapy, ale i návrh a chování interakčních prvků (ovládání měřítko, filtrů, vrstev, dotazování, časové osy apod.), protože ty přímo tvoří onen dialog člověk–mapa (Roth, 2013a).

4.2.2 Dělení webových/interaktivních map

Klasifikace webových map se v průběhu času vyvíjí spolu s dynamickým rozvojem technologií a měnícími se přístupy k prezentaci geografických informací na internetu. Jednu z raných a dlouhodobě citovaných typologií představili Kraak a Brown (2001), kteří rozlišovali mezi **statickými a dynamickými mapami** a dále tyto kategorie dělili na mapy „pouze k prohlížení“ a mapy s „interaktivním rozhraním a/nebo obsahem“ (Obrázek 10).

Tato klasifikace odrážela stav technologií počátkem 21. století, kdy se interaktivita teprve postupně prosazovala. Jak však sami autoři upozornili, rychlý technologický vývoj znemožňuje vytvořit pevně platné schéma, protože nové formy webových vizualizací neustále překračují stávající rámce. V dnešní době je proto klasifikace Kraaka a Browna (2001) již **překonaná** a nereflexuje celou šíři aktuálních možností webové kartografie.

Současné přístupy ke klasifikaci webových map berou v úvahu **širší spektrum faktorů** – vedle staticčnosti či dynamiky také míru interaktivity, způsob zobrazování, použité technologie, datové zdroje a funkční kontext. V tomto ohledu je vhodnější modernější dělení, které vychází primárně z hlediska interaktivity (Nétek, 2020) a rozlišuje mezi mapami „pouze k prohlížení“ a interaktivními mapami statického nebo dynamického charakteru (Obrázek 10).

Původní překonané dělení webových map (Kraak a Brown, 2001):



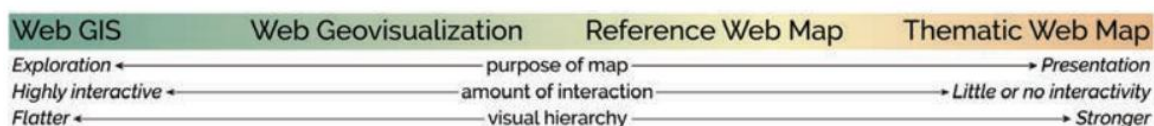
Nové vhodnější dělení webových map podle interaktivity (Nétek, 2020):



Obrázek 10: Klasifikace webových map (zdroj: Kraak a Brown (2001) a Nétek (2020), upraveno).

Sack (2018) ve své disertační práci představuje **konceptuální model kategorizace** webových map založený na třech kontinuálních parametrech: (1) **účelu mapy** (explorace–prezentace), (2) **míře interaktivity** a (3) **síle vizuální hierarchie**. Na základě těchto dimenzí vymezuje čtyři základní typy: (i) **Web GIS**, (ii) **Web Geovisualization**, (iii) **Reference Web Map**

a (iv) **Thematic Web Map (Obrázek 11)**. Například, na pravém pólu modelu se nachází *Thematic Web Map*, která je charakteristická nízkou až minimální mírou interaktivity, výrazně strukturovanou a silně akcentovanou vizuální hierarchií a dominantním prezentačním účelem. V tomto případě je mapové dílo primárně navrženo jako komunikační nástroj pro sdělení konkrétní tematické informace předem definovanému publiku. Interakce uživatele bývá omezená na základní operace (např. přiblížení či zobrazení popisu), přičemž důraz je kladen na jasnou kompozici, jednoznačnou interpretaci obsahu a efektivní vizuální komunikaci sdělení.



Obrázek 11: Klasifikace webových mapy do čtyř kategorií podle Sacka (2018).

Na počátku tisíciletí převažovaly na webu zejména **statické webové mapy**, které uživatelům nabízely neměnný obsah. Přesto i v rámci statických map existovaly pokusy o zapojení interaktivity. Příkladem byly tzv. **klikací mapy** (např. *Zoomify*), které využívaly strukturu vzájemně propojených hypertextových odkazů a uživateli umožňovaly základní manipulaci se zobrazením, typicky změnu měřítka. Tyto jednoduché technologie však byly postupně nahrazeny pokročilejšími webovými mapovými službami a dnes se již prakticky nepoužívají (Nétek, 2020).

Interaktivita a dynamika

V internetové kartografii představuje interaktivita jeden z klíčových faktorů, avšak v kontextu webových map je třeba rozlišovat mezi **interaktivitou** a **dynamikou**. Obě vlastnosti se mohou vyskytovat samostatně i společně, přičemž je lze posuzovat na úrovni celé mapy nebo jejích jednotlivých prvků (Nétek, 2020). Mapa je považována za interaktivní, pokud uživateli umožňuje ovlivňovat její obsah nebo vzhled – typicky prostřednictvím přiblížení a posunu (zoom, pan), zapínání či vypínání vrstev, změny jejich pořadí nebo zobrazení doplňkových informací (např. vyskakovací okna či postranní panely po kliknutí na prvek) (Nétek, 2020). **Interakce** je realizována prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní (GUI), které využívá tlačítka s ikonami a specifickými funkcemi (Cybulski a Horbinski, 2020). Podle Kraaka a Browna (2001) stačí pro základní interaktivitu i tak jednoduché funkce, jako je zoom nebo přepínání vrstev. V širším pojetí je interaktivní mapa taková, která umožňuje uživateli aktivně rozhodovat o obsahu a způsobu zobrazení (Cartwright a Peterson, 1999).

Manson a kol. (2012) rozlišují čtyři úrovně interaktivity podle způsobu práce s daty:

1. **Reprezentace dat** – základní funkce (zoom, pan, změna znaku), běžné u standardních webových map.
2. **Časová a atributová interakce** – animace, porovnání časových období, reorganizace dat podle hodnot atributů.
3. **Práce s daty** – pokročilé funkce jako databázové dotazy, filtrování a zvýrazňování prvků, využití sekundárních vrstev.
4. **Manipulace s kontextem** – kombinace více datových zdrojů, různé pohledy na stejný dataset, komplexní analytické interakce.

Zatímco **interaktivita** souvisí s činností uživatele, **dynamika** se týká změn v mapě vyvolaných buď interakcí uživatele, nebo (automaticky) v čase. V užším smyslu dynamika odkazuje na reakci mapy na akce uživatele – přiblížení, posun, změnu vrstev či filtrování. V širším pojetí zahrnuje i časovou dimenzi, tedy schopnost mapy zobrazovat měnící se jevy a procesy (např. aktualizace dat v reálném čase, animace vývoje jevů) (Nétek, 2020; Smith a kol., 2011). Dynamické mapy tak poskytují nejen možnost interaktivní manipulace, ale také aktualizovaný a kontextově relevantní obsah. Podle Štencka (2015) plní dynamické mapy dvě hlavní funkce: (i) přitahují uživatelskou pozornost a (ii) umožňují zobrazovat procesy a změny v čase.

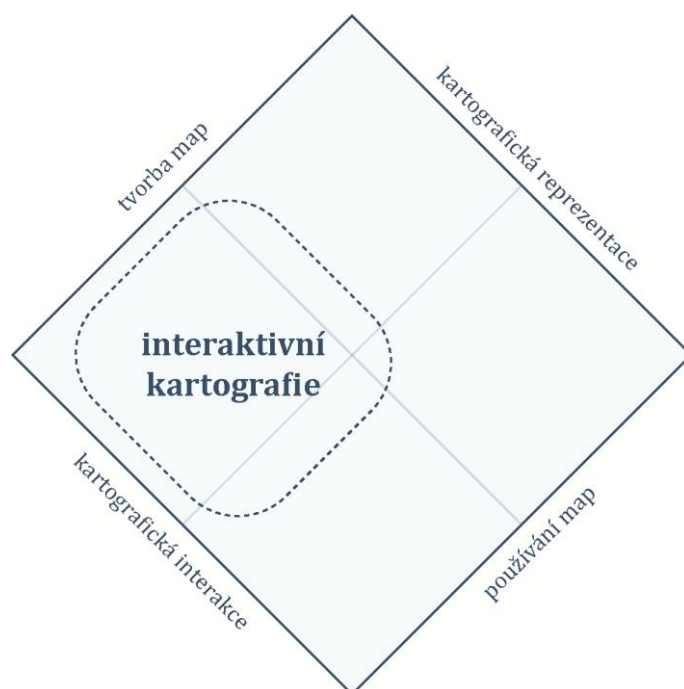
Kartografická interakce

Podle Rotha (2012; 2015; 2015b) by měla být kartografická interakce chápána jako **dvojsměrný dialog mezi uživatelem a mapou** prostřednictvím digitálních technologií. Tento dialog je realizován sérií otázek a odpovědí, kdy uživatel klade mapě otázky prostřednictvím interakcí (např. posun, přiblížení, zapnutí vrstev) a mapa na ně odpovídá zobrazením prostorových informací. Člověk a mapa jsou si zde rovnocennými partnery – každý z nich má možnost ovlivnit druhého (Roth, 2013a).

Takto definovaná interakce je v souladu s principy UX designu, neboť cílem je dosažení uživatelských cílů a zajištění pozitivní zkušenosti při práci s digitálním rozhraním (Roth, 2015). Kartografická interakce zahrnuje nejen pasivní čtení mapy, ale zejména **aktivní manipulaci** s mapou, která umožňuje efektivnější získávání informací a jejich následnou analýzu. Typickými příklady jsou posouvání mapy, změna měřítko, filtrování či vyvolání detailních informací o vybraných objektech.

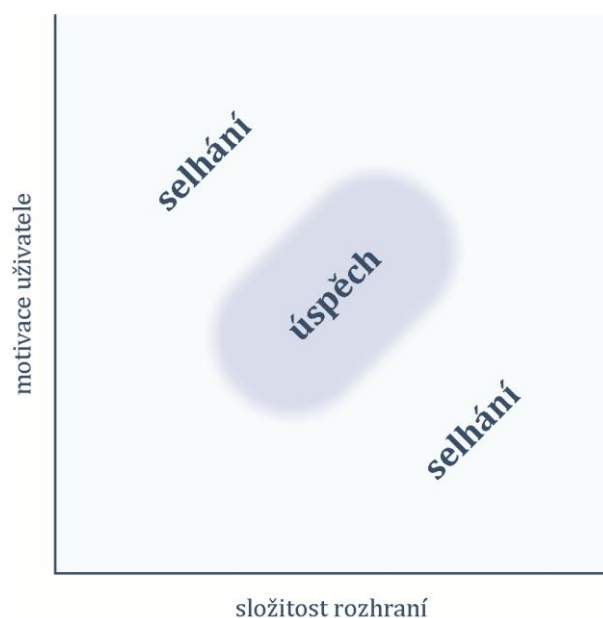
Úspěch kartografické interakce je **ovlivněn řadou faktorů**. Na straně uživatele se jedná o vnímání, kognitivní schopnosti, prostorovou představivost, dovednosti ovládání technologií, expertízu a motivaci. Na straně technologie hrají roli zejména vstupní a zobrazovací zařízení, rychlost odezvy, dostupná výpočetní kapacita či kvalita vizualizace (rozlišení, barevná hloubka). Porozumění těmto faktorům je klíčové pro návrh efektivních a uživatelsky přívětivých kartografických rozhraní (Gahegan, 1999; Haklay a Li, 2010).

Roth (2013a; 2013b) zařazuje **interaktivní kartografii** mezi čtyři hlavní výzkumná témata kartografie (tvorba map, kartografická reprezentace, používání map a kartografická interakce) – **Obrázek 12**. Interaktivní kartografie zde tvoří průnik těchto oblastí a zdůrazňuje význam zkoumání vztahů mezi uživatelem a mapou.



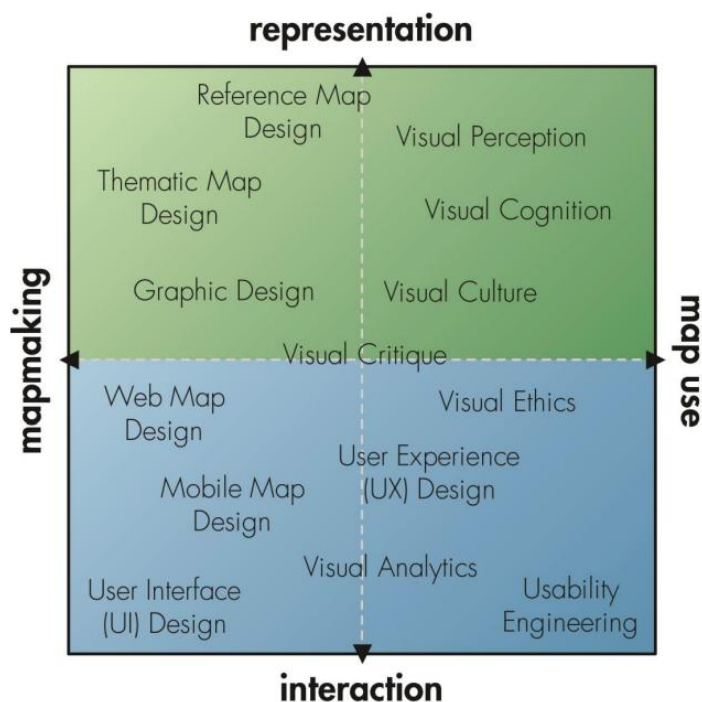
Obrázek 12: Zařazení interaktivní kartografie podle Rotha (2013a), upraveno.

Roth (2013a) rovněž upozorňuje, že úspěch kartografické interakce závisí na vztahu mezi **složitostí rozhraní** a **motivací uživatele**. Pokud je rozhraní příliš složité a motivace uživatele nízká, interakce končí neúspěchem. Naopak, při vyšší motivaci a přiměřené složitosti lze dosáhnout úspěšné a efektivní interakce (**Obrázek 13**).



Obrázek 13: Vztah úspěchu kartografické interakce mezi složitostí rozhraní a motivací uživatele podle Rotha (2013a), upraveno.

Dále se podle [Rotha \(2017\)](#) dělila kartografie tradičně na témata „**tvorby map**“ (*map making*) a „**používání map**“ (*map use*), nicméně pokroky v digitálních mapových technologiích vyžadovaly zohlednění druhého rozlišení, a to „**reprezentace**“ (*representation*) a „**interakce**“ (*interaction*) – **Obrázek 14**. Výzkum a design interaktivních map tak nyní čerpají z kombinace obou dimenzí ([Roth, 2017](#)).

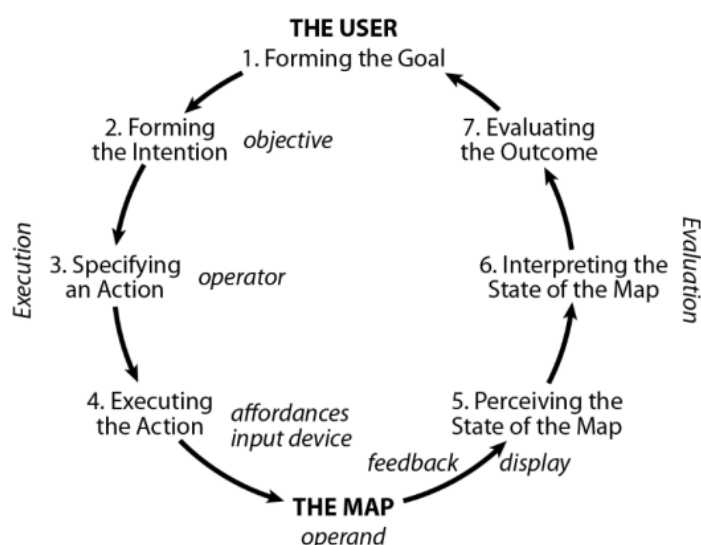


Obrázek 14: Rozdělení témat kartografické interakce do oblastí mimo tradiční kartografii podle [Rotha \(2017\)](#).

Interakční primitiva (typy interakcí)

V souvislosti s interaktivitou a dynamikou webových map je vhodné představit koncept interakčních primitiv. Tento pojem označuje **základní jednotky interakce** mezi uživatelem a mapou – tedy **jednotlivé kroky**, pomocí nichž uživatel komunikuje s vizualizací a prostřednictvím ní získává prostorové poznatky. Každá interakce tak představuje určitý druh „dialogu“ mezi člověkem a mapou, v němž uživatel klade otázky (např. „co se stane, když přiblížím mapu?“) a systém (mapa) na ně odpovídá vizuální změnou zobrazení ([Roth, 2012](#)).

Interakce je součástí **uživatelského zážitku** (*user experience, UX*) u webových map a je zpřístupněna pomocí **uživatelského rozhraní** (*user interface, UI*), které nabízí sadu prvků pro uživatele a s těmi může uživatel manipulovat. Uživatelský zážitek z webové mapy lze rozdělit pomocí [Normanova \(1988\)](#) modelu – **Obrázek 15**.



Obrazek 15: Model navržený Normanem (1988) aplikovaný na kartografickou interakci (zdroj: Roth (2012) a Sack (2018)).

Aby mohl uživatel interagovat, nejprve si **stanoví cíl** (*goal*) na základě své motivace k používání mapy. Poté si vytvoří **záměr** (*intention*), který má k dosažení cíle přispět, například něco v mapě identifikovat nebo porovnat. Pokud je to možné, uživatel poté převede svůj záměr do **akce** (*action*) pomocí prvků uživatelského rozhraní určených pro konkrétní interakce, jako jsou tlačítka pro přiblížení nebo vyhledávací pole. Uživatelé zjistí, které části rozhraní mají použít pomocí zabudovaných **nápověd** (*affordances*), které odhalují, jak s rozhraním interagovat (např. symboly + a –, ikona lupy, stínování označující aktivní tlačítko atd.). Uživatel provede akci pomocí **vstupního zařízení**, jako je myš nebo klávesnice, a poté vnímá stav systému na základě **zpětné vazby** nebo signálů, které rozhraní dává uživateli a které ukazují, jaký výsledek nastal. Tato zpětná vazba pomáhá uživateli pochopit nový stav mapy a vyhodnotit, zda dosáhl svého cíle. Cyklus pak začíná znovu a pokračuje, dokud uživatel udržuje zájem nebo cíl, který chce dosáhnout při interakci s mapou.

Roth (2012) shrnul dosavadní teoretické přístupy k mapové interaktivitě a navrhl přehlednou **taxonomii interakčních primitiv**, která klasifikuje základní typy interakcí podle jejich cíle a funkce. Následně Roth (2013a; 2013b) tuto taxonomii rozšířil a empiricky ověřil pro oblast kartografických vizualizací. Jeho přístup vychází z předpokladu, že každá interakce s mapou má svůj **cíl** (*goal*), **akci** (*operator*) a **objekt** (*operand*). Tato struktura rozlišuje:

- ↳ **Tři hlavní cíle** interakce (*goals*): **explore** (explorativní procházení mapy), **analyze** (odhadování trendů, vztahů, závislostí) a **synthesize** (manipulace s mapou s cílem odhalení nových závěrů). Tyto cíle odpovídají širším kognitivním účelům práce s interaktivní mapou.
- ↳ **Pět funkčních záměrů** interakce (*objectives*): **identify** (nalezení konkrétního prvku), **compare** (porovnání hodnot), **rank** (řazení prvků), **associate** (hledání souvislostí) a **delineate** (vymezování rozsahu). Tyto záměry představují konkrétní analytické úkoly, které uživatel realizuje prostřednictvím interakce.

- ↳ **Pět povolujících operátorů** (*enabling operators*): **pan** (posun), **zoom** (přiblížení nebo oddálení), **reexpress** (změna obsahu), **resymbolize** (změna znaků), **overlay** (překrytí vrstev). Tyto operátory umožňují práci s obsahem a připravují podmínky pro analytické operace.
- ↳ **Dvanáct pracovních operátorů** (*working operators*): **select** (výběr), **retrieve** (získání informace), **filter** (filtrování), **sort** (třídění), **calculate** (počítání), **aggregate** (agregování), **cluster** (shlukování), **reclassify** (reklasifikace), **correlate** (hledání vztahů), **annotate** (poznámkování), **bookmark** (ukládání záložek), **share** (sdílení). Tyto operátory představují vlastní analytickou či interpretační činnost nad daty.
- ↳ **Tři typy operandů** (*operand types*): **space** (prostor), **time** (čas) a **attribute** (atribut). Operandy představují objekty, na něž se operátory aplikují – tedy dimenze dat, s nimiž uživatel manipuluje.

Tento model umožňuje popsat interakci nejen jako technickou operaci, ale jako **kognitivní proces**, v němž uživatel kombinuje různé druhy operací pro dosažení specifického cíle. Díky tomu lze lépe porozumět tomu, **proč a jak lidé s mapami pracují** – a jaké kognitivní chyby či strategie při tom uplatňují. Právě taxonomie operátorů jsou nejužitečnější pro kategorizaci konkrétních interakcí, které jsou uživatelům k dispozici ve webové mapě.

Na základě této teorie vznikla řada empirických studií, které zkoumaly chování uživatelů při práci s interaktivními mapami. Například [Roth a MacEachren \(2016\)](#) identifikovali **šest typických vzorců** problémového chování:

- ↳ uživatelé, kteří **příliš rychle** aplikují různé operátory a ztrácejí přehled o prostorově-časových vzorcích,
- ↳ nadměrné **využívání filtrace** bez jasného účelu,
- ↳ **dezorientace** při častém přiblížení a posunu mapy,
- ↳ tvorba **nevhodných vizuálních reprezentací** vedoucích k chybným interpretacím,
- ↳ **nepochopení kontextu** při změně měřítka,
- ↳ **rychlé vyhledávání informací** bez schopnosti je správně interpretovat.

Studium těchto interakcí ukazuje, že i zdánlivě jednoduché operace, jako je posouvání či přiblížení mapy, mohou vyvolávat komplexní uživatelské strategie, chyby či různé interpretační problémy. Interakční primitiva tak představují **základní analytický rámec** pro pochopení vztahu mezi uživatelem a mapou a jsou tak důležité při návrhu i hodnocení interaktivních kartografických vizualizací.

Kromě definice interakčních primitiv, [Roth \(2013b\)](#) dále vytvořil explicitní taxonomii 12 druhů interakcí s mapou – **Tabulka 1**.

Tabulka 1: Běžné operátory interakce s mapou identifikované [Rothem \(2013\)](#).

Operátor	Popis
<i>Zoom</i> (přiblížení/oddálení)	změnit měřítko mapy a/nebo úroveň detailů
<i>Pan</i> (posun)	změnit geografický střed mapy
<i>Overlay</i> (překrytí vrstev)	přidat nebo odebrat vrstvy prvků nebo změnit mapovaný atribut
<i>Retrieve</i> (získání informace)	zobrazit konkrétní podrobnosti o mapové funkci nebo funkcích
<i>Search</i> (vyhledání)	identifikovat konkrétní místo nebo zajímavost
<i>Filter</i> (filtrování)	identifikovat funkce splňující podmínky definované uživatelem
<i>Sequence</i> (sekvence)	přesun mezi uspořádanou sadou souvisejících zobrazení mapy
<i>Resymbolize</i> (změna znaku)	změnit parametry designu znaků mapy bez změny typu mapy
<i>Reexpress</i> (změna obsahu)	změnit typ tematické vizualizace použité na mapě
<i>Reproject</i> (změna projekce)	změnit mapovou projekci
<i>Arrange</i> (uspořádání)	manipulovat s rozložením prvků uživatelského rozhraní
<i>Calculate</i> (výpočet)	získat nové informace o prvcích mapy podle zájmu

Tato **taxonomie (Tabulka 1)** však neobsahuje novější operátory v souvislosti s vývojem webových map; avšak nevylučuje jejich přidávání. Například, některé aplikace umožňují otáčení map, což [Rothova \(2013b\)](#) taxonomie nezahrnuje.

Na základě další syntézy poznatků z odborné literatury ([Andrienko a Andrienko, 2006](#); [Crampton, 2002](#); [MacEachren, 1995](#); [MacEachren, 1994](#); [Roth, 2012](#); [Roth, 2013a](#); [Roth, 2013b](#); [Shneiderman, 1996](#)) lze tedy určit nejběžnější interakce:

- ↳ **Pan** (posun mapy) – horizontální či vertikální posun mapového pole;
- ↳ **Zoom** (přiblížení/oddálení) – změna měřítka zobrazení;
- ↳ **Select** (výběr) – označení prvku nebo oblasti zájmu;
- ↳ **Filter** (filtrace) – zobrazení pouze vybraných dat podle podmínek;
- ↳ **Layer control** (změna vrstev) – zapínání a vypínání tematických vrstev;
- ↳ **Identify** (získání informací o prvku) – zobrazení atributových dat po kliknutí;
- ↳ **Search** (vyhledávání) – nalezení prvku podle názvu nebo atributu;
- ↳ **Measure** (měření vzdáleností nebo plochy);
- ↳ **Annotate** (poznámkování, zvýraznění prvků);
- ↳ **Export/Share** (sdílení mapy či výsledků).

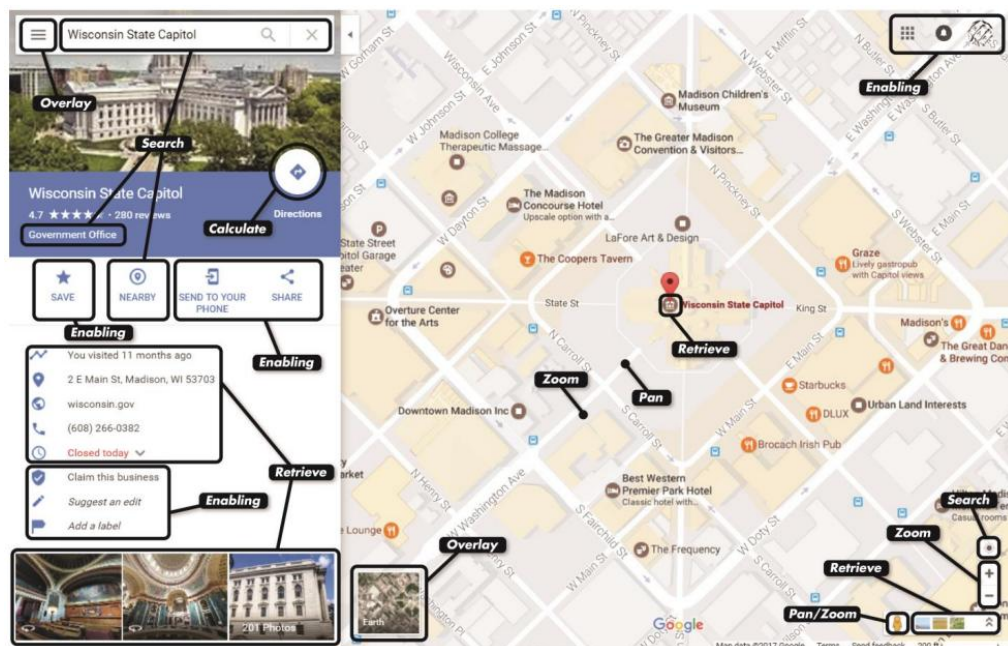
Na [Rothovu \(2013b\)](#) taxonomii interakčních primitiv navazuje pozdější rozpracování konceptu rozhraní interaktivní mapy jako systému, který interakci nejen umožňuje, ale také strukturálně omezuje. V tomto kontextu je klíčové rozlišit mezi pojmy **flexibilita** a **svoboda** (*freedom*) interakce ([Shneiderman a kol., 2009](#)).

Flexibilita rozhraní označuje **počet různých komponent** uživatelského rozhraní, jejichž prostřednictvím lze realizovat tentýž interakční operátor. Typickým příkladem je operátor *zoom*: v běžných webových mapách může být proveden pomocí tlačítek +/–, kolečka myši, klávesových zkratk nebo vícedotykového gesta (*pinch*) na dotykovém zařízení. Vyšší

flexibilita tedy znamená větší redundanci interakčních mechanismů, což může zvyšovat použitelnost v závislosti na kontextu užití a preferencích uživatele.

Svoboda interakce (*interface freedom*) naproti tomu vyjadřuje **míru jemnosti, přesnosti či kontinuity**, s níž lze daný operátor realizovat. Například rastrové dlaždicové mapy obvykle umožňují přiblížení pouze na předdefinované úrovni měřítka, zatímco vektorové dlaždice dovolují plynulé škálování prakticky bez omezení. Vektorová reprezentace tak poskytuje vyšší svobodu pro operátor *zoom*, neboť uživatel může volit téměř libovolnou úroveň měřítka.

Roth (2017) dále ukazuje, že svoboda rozhraní spolu s celkovým počtem dostupných interakčních operátorů (tzv. *interface scope*) společně určují **komplexitu rozhraní** (*interface complexity*). Ta může být chápána jako počet unikátních mapových pohledů (*map views*), které je uživatel schopen vytvořit kombinací dostupných operátorů a jejich parametrů. Jinými slovy, čím větší je rozsah operátorů a čím vyšší je jejich svoboda, tím větší je prostor stavů, do nichž může uživatel mapu přivést. Tento koncept přímo souvisí s dřívějším rozlišením mezi prezentačním a exploračním užitím mapy (DiBiase, 1990). Podle DiBiaseho (1990) by míra komplexity rozhraní měla odpovídat povaze mapové úlohy: **čím explorativnější je účel mapy, tím vyšší komplexita rozhraní je doporučena**. Naopak u map určených primárně pro komunikaci konkrétní informace může nadměrná komplexita představovat kognitivní zátěž a negativně ovlivnit použitelnost. Z hlediska hodnocení použitelnosti IKV je proto vhodné chápat Rothovu (2013b) taxonomii nejen jako klasifikaci operátorů, ale jako **strukturální základ pro analýzu rozhraní**. Kombinace typů operandů (prostor, čas, atribut), pracovních a povolujících operátorů, jejich flexibility a svobody vytváří konkrétní interakční ekosystém, jehož komplexita by měla být systematicky posuzována ve vztahu k výzkumnému či aplikačnímu cíli mapy. Celkově vzato, každá interaktivní mapa může být rozčleněna na **základní interaktivní prvky** reprezentující interakční primitiva (Roth, 2017) – **Obrázek 16**.



Obrázek 16: Příklad interaktivní mapy (Google Maps) rozložené na interaktivní prvky podle podporovaných interaktivních operátorů, přičemž každá interakce souvisí s jeho funkčním účelem (zdroj: Roth (2017)).

4.2.3 Interaktivní mapy v kontextu hodnotících studií

Předchozí části této kapitoly o současném stavu řešené problematiky se zaměřily na dvě klíčová východiska: (i) **použitelnost** jako vícerozměrný konstrukt podmíněný kontextem užití a (ii) **IKV jako digitální produkty**, v nichž je určující nejen kartografická reprezentace, ale také dialog interakce člověk–mapa. V této logice však dosud zůstala otevřená otázka, jak interaktivní mapy metodologicky **hodnotit** tak, aby výsledky byly interpretovatelné nejen ve smyslu *líbí/nelíbí*, ale jako **empiricky podložené poznatky** využitelné pro návrh, srovnání či iterativní zlepšování map. Z tohoto důvodu jsou v této podkapitole popsána **zjištění z vybraných studií** z pohledu interaktivních map v kontextu jejich hodnocení použitelnosti tak, aby přiblížily problematiku převážně z metodologického hlediska evaluace.

Hodnocení IKV stojí na průniku kartografie, geovizualizace a HCI (Tobón, 2005). Již agenda uživatelských studií v kartografii upozorňuje, že interaktivita v digitálních mapách nutí přehodnotit tradiční pojetí „čtenáře mapy“ směrem k „uživateli mapy“ a systematicky řešit percepční, kognitivní, kulturní i praktické aspekty jeho zkušenosti s interaktivními mapami (Cybulski a Horbinski, 2020; Roth a kol., 2017). Roth a kol. (2017) tento posun explicitně formulují a rámuji jej jako příležitost i výzvu pro empirický výzkum interaktivních map a vizualizací. Komise⁶ v rámci ICA (2021) je v tomto směru dlouhodobě aktivní platformou pro artikulaci výzkumných témat a metodologických potřeb uživatelských studií.

Základní rozdíl mezi statickou a interaktivní mapou z hlediska jejího hodnocení použitelnosti spočívá v tom, že u statické mapy je stimul v principu fixní (všichni respondenti vidí totéž), zatímco u interaktivní mapy je stimul **stavový a proměnlivý** – uživatel jej aktivně **mění** a změny mohou být v čase i mezi uživateli zásadně odlišné. Tato dynamika se netýká pouze obsahu v mapovém okně, ale i **kontextu práce** s mapou (přepínání vrstev, změna měřítko, vyhledávání, dotazování, návratové akce, práce s legendou či filtry). Hodnocení IKV proto musí zachytit nejen **výsledek** (správnost odpovědi), ale i **proces** (jaké kroky vedly k řešení, jaké stavy mapy uživatel vytvořil, kde uživatel ztratil orientaci či zda je rozhraní kognitivně náročné k ovládnutí). Tento problém je dobře patrný na příkladu běžných operací *zoom* a *pan*: jedna a tatáž pozice na obrazovce může v průběhu interakce odpovídat **různým geografickým objektům** nebo **různým úrovním detailu**. To komplikuje jak srovnávání mezi uživateli, tak automatizovanou analýzu, protože „co bylo viděno“ či „co bylo relevantní“ se mění spolu se stavem mapy. Ooms a kol. (2015) tento problém ilustrují na interaktivních a dynamických aplikacích, kde *zoom* a *pan* mění rozsah a detail zobrazení, a proto i při fixní pozici pohledu může být obsah v daném místě v čase odlišný; bez doplňkových dat je obtížné automaticky porovnávat „měnící se informaci v pozorovaném bodě“ napříč účastníky.

Z metodologického hlediska se zde tedy projevují tři vrstvy odlišností oproti statickým mapám. Zaprvé, variabilita stimulu mezi účastníky je inherentní součástí designu interaktivní mapy a nelze ji zcela odstranit bez toho, aby se interaktivita stala pouze „předstíranou“ (např. předrenderovanými snímky). Zadruhé, v interaktivních mapách se část použitelnosti realizuje jako schopnost „naučit se nástroj“, zapamatovat si postupy a účelně volit interakční operátory – tedy aspekty, které u statických map (kde chybí interakční vrstva) buď nejsou přítomny, nebo mají podstatně menší význam. Zatřetí, interaktivní mapa je typicky používána v heterogenních

⁶ ICA. UX: Designing the User Experience – A Commission of the International Cartographic Association [online]. ICA, [cit. 2026-03-05]. Dostupné z: <https://use.icaci.org/>

situacích (zařízení, velikost displeje, vstupní modality, kvalita připojení, rušení), což dále zvyšuje význam kontextu užití a snižuje přenositelnost závěrů bez pečlivé operacionalizace.

Tato specifika se promítají i do toho, co se vlastně v hodnocení použitelnosti map považuje za „problém“. Zatímco u statických map bývají problémy často interpretovány jako důsledky nevhodného výběru znaků, generalizace či kompozice, u interaktivních map se přidává celá třída problémů jako **objevitelnost** ovládacích prvků, **srozumitelnost** režimu (*state awareness*), **chybové stavy** při práci s nástroji, **rychlost odezvy** systému, **čitelnost** průběžného načítání a obecně **kvalita dialogu** člověk–mapa. Z tohoto důvodu Nivala (2007) explicitně upozorňuje, že tradiční mapové návrhové a hodnotící postupy nemusí být pro webové mapy vždy validní, protože nové technologie přinášejí nové způsoby vizualizace a interakce, a tím i nové typy uživatelských obtíží.

Metodologicky lze evaluaci IKV chápat jako **kombinaci inspekčních a empirických přístupů**, které se liší mírou kontroly, náročností realizace a typem produkovaných poznatků (Çöltekin a kol., 2009; Hornbæk, 2006). Ve výzkumu map se dlouhodobě ukazuje, že žádná evaluační metoda sama o sobě typicky nestačí – jednak kvůli komplexitě interaktivních map, ale také kvůli rozdílu mezi tím, co uživatelé deklarují, a tím, co skutečně dělají při řešení úloh (Çöltekin a kol., 2010; Çöltekin a kol., 2009; ISO, 2018; Roth a kol., 2017).

Empirický pól reprezentují kontrolované laboratorní studie (uživatelské testování) a vzdálené či terénní studie (*remote/field testing*). **Inspekční pól** zahrnuje expertní hodnocení (např. posouzení podle principů použitelnosti či heuristik), případně strukturované průchody úlohami, jejichž cílem je odhalit zjevné bariéry bez nutnosti rekrutovat velký vzorek uživatelů. V praxi se tyto přístupy často kombinují, kdy expertní fáze předchází uživatelskému testování a slouží k rychlé identifikaci „nejviditelnějších“ problémů; uživatelské testování pak ověřuje reálné dopady na výkon a strategii (Jaspers, 2009; Khajouei a Farahani, 2020).

Klasicky citovaným příkladem kombinovaného přístupu je studie webových mapových portálů (Nivala a kol., 2008), v níž byly paralelně použity **expertní evaluace** (osm „usability engineerů“ a osm kartografů) a laboratorní uživatelské testy (osm běžných uživatelů). Nivala a kol. (2008) ukazují, že tato kombinace vede k rozsáhlému zachytu problémů a zároveň umožňuje třídit problémy podle závažnosti, nikoli pouze podle četnosti.

Vedle klasických laboratorních postupů je nejen pro interaktivní mapy stále důležitější evaluace v **přirozeném prostředí uživatele** (Barcelos a kol., 2025; Sharma a Kumar, 2025). Ta umožňuje zachytit proměnné, které laboratoř typicky potlačuje (odlišné zařízení, rušivé vlivy, reálné časové tlaky, „domácí“ strategie práce), ale současně zvyšuje riziko intervenujících proměnných a snižuje kontrolu nad podmínkami. Metodologickým řešením je platformní přístup založený na automatickém záznamu interakcí a doplňkových dotaznících či úlohách – tedy kombinace kvantitativních a kvalitativních dat v jedné infrastruktuře. Na druhou stranu, v případě eye-tracking metody (převážně u stacionárních eye-trackerů) jsou tato řešení v přirozeném prostředí **složitá na realizaci**, a proto je hodnocení metodou eye-tracking nejčastěji prováděno právě v laboratorních podmínkách (Asan a Yang, 2015; Krassanakis a Cybulski, 2021).

U interaktivních map se jako užitečné ukazuje rozšířit klasické jádro použitelnosti (účinnost, efektivnost, spokojenost) o metriky, které explicitně reflektují interakční charakter systému; tedy naučitelnost a zapamatovatelnost postupů, chybovost při práci s nástroji, schopnost

obnovy po chybě, případně subjektivně vnímanou srozumitelnost funkcí (Hornbæk, 2006; Roth a kol., 2017).

Tento důraz na „naučení se interakční logiky“ je výrazný zejména u geovizualizačních nástrojů, které zavádějí méně známé interakční principy. Andrienko a kol. (2002) hodnotili použitelnost **pěti interaktivních nástrojů** pro explorativní analýzu v prostředí *CommonGIS* právě přes naučitelnost, zapamatovatelnost a uživatelskou spokojenost. Zároveň ukázali, že uživatelé sice dokázali nové ideje mapové interaktivity a manipulovatelnosti v principu přijmout, avšak bez vhodného uvedení je z pouhého vzhledu mapy a ovládacích prvků často nepochopili; krátká demonstrační introdukce a následný trénink výrazně zlepšily schopnost nástroje používat.

Z hlediska návrhu experimentu pro hodnocení použitelnosti je zde metodologicky zásadní **volba úloh** pro práci s mapou. Interaktivní mapa není pouze „prezentační okno“, ale prostředí pro řešení úloh, které mohou sahát od jednoduchého vyhledání objektu až po komplexní rozhodovací či explorativní scénáře. Výběr úloh proto určuje, zda je evaluace orientována spíše na základní obsluhu rozhraní (např. vyhledávání, identifikace objektu, měření) nebo na vyšší kognitivní cíle (porovnávání, odhad vzorců, syntéza informací napříč vrstvami). Nivala a kol. (2008) ukázali, že významná část problémů koncentrovala do úkonů, které jsou u map nejběžnější, a zároveň citlivé k interakci, zejména různé vyhledávací operace.

Pro operacionalizaci metrik se u studií opakuje kombinace **výkonových ukazatelů** (čas, úspěšnost, přesnost), **procesních ukazatelů** (sekvence kroků, počet akcí, typy chyb) a **subjektivních ukazatelů** (spokojenost, vnímaná obtížnost, preference) (Hornbæk, 2006; Tullis a Albert, 2013). V případě 3D geovizualizací je tento rámec často rozšířen o individuální rozdíly (např. prostorové schopnosti), protože právě ty mohou interagovat s výhodami či nevýhodami interaktivity (Herman a kol., 2018). Například Kubíček a kol. (2019) porovnávali statické a interaktivní 3D digitální modely reliéfu a výkon uživatelů posuzovali při identifikaci výškových profilů; současně měřili prostorové schopnosti (test mentální rotace) a využili také metodu think-aloud. Jejich výsledky ukazují, že míra navigační interaktivity může mít významný vliv na použitelnost konkrétní 3D vizualizace, a proto ji nelze ignorovat ani považovat za pouhý doplněk.

Protože interaktivní mapa generuje sekvenci stavů, je klíčové zachytit nejen výsledky, ale i **průběh interakcí**. V geovizualizacích se k tomu stále častěji využívají metody **logování** (zaznamenávání) **uživatelských (inter)akcí** (*user/screen logging*), které umožňují objektivní záznam interakcí a pohybu v prostředí (zejména ve 3D a ve webových aplikacích). Herman (2019b) v tomto kontextu představil nástroj **3DmoveR** jako webovou platformu založenou na logování uživatelských akcí, kombinovanou s digitálním dotazníkem a praktickými prostorovými úlohami; zdůrazňuje přitom, že u interaktivních 3D geovizualizací jsou uživatelské aspekty stále nedostatečně prozkoumané a že právě logování akcí umožňuje „objektivně“ zaznamenat uživatelské interakce a pohyb ve virtuálním prostředí.

Tento přístup se přirozeně rozšiřuje i na **vzdálené (asynchronní) testování**, kdy účastníci pracují s aplikací v přirozeném prostředí (např. doma) a systém automaticky zaznamenává jejich aktivity. Herman (2021) ve studii zaměřené na interaktivní tematické 3D modely měst explicitně definuje metodu asynchronního vzdáleného testování použitelnosti (*remote usability testing*) založenou na softwarové platformě, která automaticky zaznamenává aktivity účastníků při interakci s produktem v jejich přirozeném prostředí; upozorňuje zároveň, že ač je tento přístup běžný ve webovém designu a vývoji mobilních aplikací, v geovizualizaci byl

využíván spíše zřídka. Ve své studii kombinuje dotazníky, trénink a opakované experimentální pokusy; zaznamenává výkon (*speed, accuracy*), strategii a subjektivní hodnocení a na konkrétním příkladu ukazuje, že i zdánlivě „kartografický“ prvek (např. barevná škála ve 3D modelu) může být empiricky vyhodnocen jako ne zcela vhodný (Herman, 2021).

Vedle záznamu interakcí roste význam **automatizované analýzy logů**, zejména u rozsáhlejších webových aplikací, kde manuální vyhodnocení není škálovatelné. Grigera a kol. (2017) ukazují, že použitelnost webových aplikací bývá nákladná a často zanedbávaná; jako jeden z výzkumných směrů proto navrhuje automatické přístupy založené na analýze uživatelských interakcí, které mohou identifikovat tzv. „usability smells“, tedy indikátory možných problémů v běžícím systému a přibližovat se až k návrhům na konkrétní úpravy rozhraní. Pro mapové aplikace má tento směr potenciál zejména tam, kde existují velké objemy interakčních dat (např. mapové portály, veřejné mapové služby), avšak současně zde naráží na kartografickou specifičnost: to, co je „suboptimální sekvence“ v běžném webu, nemusí být nutně problém v mapové exploraci, kde jsou cykly přibližování, filtrování či porovnávání často legitimní strategií hledání vzorců. Automatizace je proto v mapových aplikacích realistická spíše jako „triáž“ (indikace potenciálních problémů) než jako plná náhrada odborné interpretace (Grigera a kol., 2017).

Z výše uvedených studií lze odvodit **několik empiricky ukotvených závěrů**, které jsou pro evaluaci interaktivních map nosné a současně doplňují rámce vymezené v předchozích podkapitolách.

Za prvé, inovativní kartografické interakce vyžadují demonstraci principu a metodologicky kontrolovaný „**vstup do systému**“ (uvítací okno, nápověda, návod). Andrienko a kol. (2002) ukazují, že uživatelé mohou nové principy interakce přijmout, ale bez demonstrační introdukce je často nedokážou odvodit z rozhraní samotného; krátká demonstrace a trénink výrazně zlepšují schopnost nástroje používat. To má přímé důsledky pro design experimentu, kdy, jestliže je cílem hodnotit použitelnost nástroje „v realitě“, je třeba promyslet, jaký typ nápovědy/tréninku odpovídá zamýšlenému scénáři užití (např. napovídání ve webové aplikaci) a jak jeho přítomnost či absence ovlivní výsledky (Andrienko a kol., 2002).

Za druhé, **kombinace metod** pro testování použitelnosti je pro interaktivní mapy prakticky výhodná, protože různé metody odhalují různé třídy problémů. Nivala a kol. (2008) demonstrují, že souběh expertního a uživatelského testování může generovat stovky identifikovaných problémů (403 zaznamenaných problémů, z toho 343 unikátních), které lze dále třídit podle závažnosti (katastrofické, závažné, drobné, kosmetické) a podle části systému (UI, mapa, vyhledávání, nápověda). Tento přístup je cenný právě pro interaktivní mapy, protože umožňuje oddělit „kosmetické“ nedostatky od problémů, které reálně brání dokončení úlohy (např. chyby ve vyhledávání či reakci systému).

Za třetí, mapovou aplikaci lze konceptualizovat nejen jako mapu, ale jako **kompozitní rozhraní**, v němž použitelnost tvoří více prvků než samotné mapové okno. Wachowicz a kol. (2005) identifikují tři hlavní elementy pro použitelnosti mapové (*geo-web*) aplikace (*web content, human-computer interaction, user satisfaction*) a pro empirické testování rozděluje mapové rozhraní do sekcí jako *map display, table of content, basic functionalities* a *query*. Tento rámec je užitečný i metodologicky, protože připomíná, že hodnocení použitelnosti interaktivní mapy by mělo explicitně specifikovat, zda se hodnotí mapová reprezentace, rozhraní pro práci

s obsahem (vrstvy, obsahové menu) či interakce spojené s dotazováním a vyhledáváním – protože tyto složky mohou být zdrojem odlišných typů problémů a vyžadují odlišné metriky. Za čtvrté, u interaktivních (zejména 3D) map se ukazuje **význam interaktivity** jako nezávislé „designové proměnné“, která může měnit jak výkon, tak preferenci uživatelů. [Kubíček a kol. \(2019\)](#) ukazují, že „*level of navigational interactivity*“ může mít významný vliv na použitelnost 3D vizualizace, zatímco jiné faktory (např. typ stereoskopického vs. monoskopického zobrazení) nemusí mít jednoznačný efekt. V návaznosti na to pak disertační práce [Hermana \(2019a\)](#) zdůrazňuje, že pro zobecnitelné závěry o interaktivních 3D mapách je nutné používat jako stimul **skutečně interaktivní mapy** (nikoli pouze statické reprezentace, např. [Popelka \(2015\)](#)) a formulovat doporučení pro realizaci uživatelských testování (např. pilotáž, délka testu, standardizace podmínek, minimální velikost vzorku). Tyto principy jsou přenositelné i do 2D IKV, tedy interaktivita nemá být kulisa, ale kontrolovaná součást experimentu.

Za páté, existence doménově specifických interaktivních aplikací vedle „obecných“ webových map posiluje potřebu **kontextově citlivého hodnocení použitelnosti**. Například práce [Zhanga a kol. \(2019\)](#) zaměřená na interaktivní 3D vizualizaci městského „zamokření“ (*waterlogging*) ukazuje motivaci interaktivní mapy učinit výsledky simulací intuitivnějšími a umožnit jejich explorační (včetně úprav parametrů). Autoři současně konstatují, že studií kombinujících daný typ simulace a interaktivní vizualizaci je relativně málo, což implikuje prostor pro evaluace zaměřené na porozumění, správnost interpretace a použitelnost interakčních mechanismů při práci s modelovými scénáři.

Celkově lze shrnout, že studie hodnotící použitelnost interaktivních map musí pracovat se „stavovou“ povahou mapového rozhraní a s tím souvisejícími důsledky pro návrh úloh, sběr dat a interpretaci výsledků. Interaktivní mapa není jen nosič mapových znaků, ale **procedurální prostředí**, v němž uživatel vytváří vlastní mapové pohledy a strategie. To přirozeně vede k preferenci **kombinovaných metod** pro hodnocení použitelnosti, tedy výkonových metrik (čas, přesnost), procesních dat (logy, sekvence akcí) a subjektivního hodnocení (spokojenost, vnímaná obtížnost).

4.3 Metoda eye-tracking

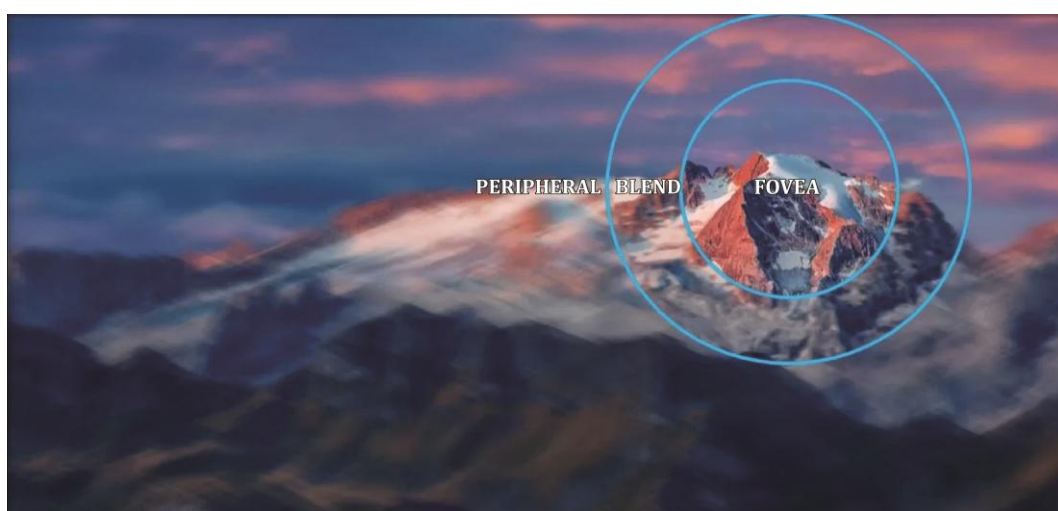
V předchozím textu této kapitoly bylo ukázáno, že hodnocení použitelnosti IKV nelze opřít pouze o to, jakou subjektivní zpětnou vazbu uživatelé poskytují (dotazníky, rozhovory), ale je žádoucí objektivně zachytit i jejich skutečné chování během řešení úloh. V tomto kontextu představuje **eye-tracking** jednu z klíčových objektivních metod, protože umožňuje zaznamenat, kam se uživatel v průběhu práce s mapovými podněty (mapově-orientovanými rozhraními) dívá, a tím nepřímo rekonstruovat jeho **vizuální chování** ([Montello, 2002](#)).

Pro účely této práce lze eye-tracking vymezit jako technologicky zprostředkovanou metodu **sledování pohybů očí**, která v definovaných časových krocích zaznamenává odhadované místo dopadu pohledu (*gaze point / point of regard*) na stimul, a tím poskytuje informaci o průběhu vizuální pozornosti během plnění úloh. Tato definice navazuje jak na kartograficky orientované pojetí eye-trackingu v kognitivní kartografii, tak na obecné pojetí v HCI a metodologických příručkách eye-trackingu ([Montello, 2002](#)). Jinými slovy se zaznamenává při určité vzorkovací frekvenci (např. 60 Hz) bod pohledu, kam se člověk dívá. Zařízení, kterým je tento pohyb možné sledovat, se nazývá eye-tracker. Veškeré detailní informace o metodě eye-tracking jsou přehledně popsány v knize [Popelka \(2018\)](#).

4.3.1 Fyziologická a percepční východiska metody

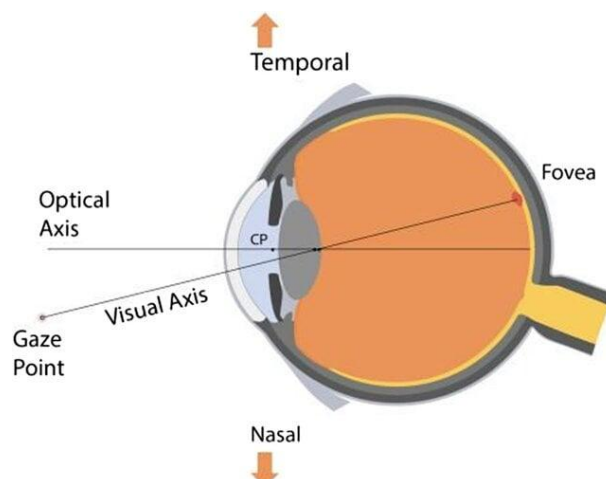
Metodologická logika eye-tracking metody je bezprostředně svázána se základními **vlastnostmi lidského zrakového systému**. Lidské vidění představuje dominantní smyslový kanál pro získávání informací z okolního prostředí a poskytuje relativně široké zorné pole přibližně 200° horizontálně a 130° vertikálně (Biedert a kol., 2010). Struktura oka umožňuje průchod světla zornicí, jeho převrácení a zaostření na sítnici (retině) v zadní části oka, kde světlocitlivé receptory – tyčinky a čípky – převádějí světelné podněty na elektrické impulzy, které jsou následně zpracovávány v mozku.

Vizuální ostrost však není v zorném poli homogenní, protože detailní (vysoko-rozlišovací) vidění je vázáno na centrální oblast sítnice – tzv. foveu (*fovea centralis*), která je specializována na vysokou hustotu čípků a jemné prostorové rozlišení (foveální vidění) – **Obrázek 17**.



Obrázek 17: Ukázka ostrosti foveálního (centrálního) vidění oproti perifernímu vidění (zdroj: Waghulde (2019), upraveno).

Foveální vidění zabírá méně než 2 % zorného pole, a proto musí lidské oči neustále měnit svou polohu tak, aby relevantní objekty dopadaly právě do této oblasti nejvyšší vizuální ostrosti (Provis a kol., 2013; Synek a Skorkovská, 2014) – **Obrázek 18**. Tento proces je realizován prostřednictvím různých **typů očních pohybů**, zejména **fixací** a **sakád**, které umožňují postupnou inspekci vizuální scény.



Obrázek 18: Lokalizace fovea oblasti zodpovědné za ostré centrální vidění a demonstrace jejího posunu ze své normální polohy na optické ose, což vyžaduje kalibrování eye-trackerů pro sledování pohybu očí (zdroj: Moreno-Arjonilla a kol. (2024)).

Pro kartografii má tato skutečnost přímý důsledek, protože IKV typicky kombinují prvky vyžadující **detailní čtení** (znaky, popisy, legenda, ovládací prvky, prostorové vzory) s prvky, které lze **vnímat periferně** (celková kompozice, hrubé kontrasty). Eye-tracking proto umožňuje empiricky zachytit, jak je vizuální inspekce mapy **organizována v čase a prostoru** a jak se uživatel mezi těmito prvky „přepíná“ (Montello, 2002).

Vztah „pozorovaný bod“ ↔ „kognitivní zpracování“ však není triviální. Zraková pozornost může být vedena jak „bottom-up“, tj. zdola nahoru (*salience*, kontrast, pohyb), tak „top-down“, tj. shora dolů (cíl úlohy, strategie, znalosti). Klasickým empirickým argumentem ve prospěch dominance úlohy nad pouhou vizuální nápadností je tradice experimentů inspirovaná Yarusovou linií (Yarbus, 1967) – tedy pozorování, že instrukce a cíl výrazně mění, kam se pozorovatel dívá (Tatler a kol., 2010).

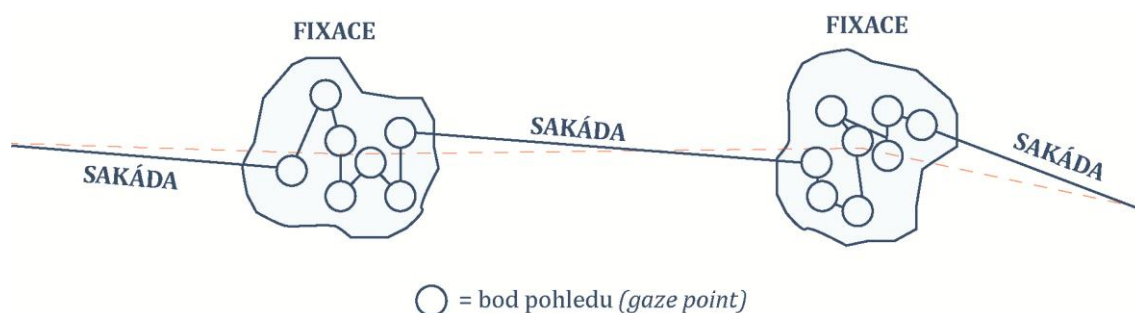
4.3.2 Základní oční pohyby

Eye-tracking data se v aplikační praxi nejčastěji interpretují prostřednictvím dvou základních kategorií očních pohybů: **fixací** a **sakád**.

Fixace představují relativně **stabilní setrvání pohledu** na jednom místě, které obvykle trvá od několika milisekund po několik desítek až stovek milisekund a během něhož probíhá samotné zpracování vizuální informace (Holmqvist a kol., 2011). Během fixace však oko není zcela nehybné a dochází k drobným „mikrosakádám“ (Martinez-Conde a Macknik, 2008). Tyto drobné pohyby oka jsou nevědomé a pro jejich měření je nutné disponovat zařízením s velmi vysokou frekvencí snímání. Ačkoliv mají mikrosakády významnou roli zejména ve zdravotnictví (van der Geest a kol., 2001), v kartografii jim nebývá věnována větší pozornost. V kartografickém výzkumu, zejména pro hodnocení použitelnosti metodou eye-tracking, se proto využívají především fixace a jejich umístění v prostoru, jejich délka a sekvence v čase.

Sakády jsou naopak velmi **rychlé přesuny pohledu** mezi jednotlivými fixacemi. Jedná se o balistické pohyby očí. Během sakád je vizuální vnímání výrazně omezeno (*saccadic suppression*), takže z hlediska interpretace mapového obsahu se sakáda chápe primárně jako

přesun mezi dvěma místy zpracování (Hammoud a Mulligan, 2008; Ooms a kol., 2012a; Rayner, 1998) – **Obrázek 19**. Sakády se při vizualizaci eye-tracking dat obvykle znázorňují jako přímé spojnice mezi fixacemi. Ve skutečnosti však jejich trajektorie nemusí být zcela přímá a může vykazovat různé odchylky či zakřivení. Často také nedochází k přesnému zastavení oka v cílovém bodě a před stabilizací pohledu může oko krátce „kolísat“ (tzv. *glissade*). Celkově lidské oči vykonají přibližně tři až čtyři sakády za sekundu, což v průběhu dne představuje řádově stovky tisíc očních pohybů (Bojko, 2013; Popelka, 2024).



Obrázek 19: Princip očních pohybů – fixace a sakády. Když jsou body pohledu velmi blízko u sebe, ať už v čase nebo v prostoru, tvoří svazek bodů pohledu (*gaze cluster*) a tento shluk tvoří fixaci.

V kartografickém výzkumu se **fixace** často používají jako empirický indikátor míst, kde si uživatel mapu detailně prohlíží, zatímco **sekvence fixací** (*scanpath*) se interpretuje jako stopa strategie vizuálního vyhledávání. Současně je nutné zdůraznit metodologické omezení, tedy skutečnost, že samotná informace o tom, kam se uživatel dívá, nevysvětluje, proč tam pohlédl ani co přesně z vizuální informace pochopil. Tato opatrnost je v metodologické eye-tracking literatuře dlouhodobě akcentována a v kartografických aplikacích se promítá do doporučení kombinovat eye-tracking s dalšími metodami sběru dat (viz 4.3.6) (Jacob a Karn, 2003).

Popelka (2024) také upozorňuje, že z hlediska zpracování eye-tracking dat je důležité, že identifikace fixací a sakád v surových záznamech pohybů očí **není triviální úloha**. Fixace lze sice identifikovat manuálně (Harris a kol., 1988), v praxi se však používá řada **klasifikačních algoritmů**. Mezi nejrozšířenější patří algoritmy založené na prahových hodnotách rychlosti (**I-VT** – *Velocity Threshold Identification*) nebo prostorového rozptylu bodů pohledu (**I-DT** – *Dispersion Threshold Identification*) (Komogortsev a kol., 2010; Salvucci a Goldberg, 2000). Algoritmus I-DT identifikuje fixace na základě prostorové a časové blízkosti zaznamenaných bodů pohledu: v rámci definovaného časového okna se vyhodnocuje, zda rozptyl bodů nepřekračuje stanovený práh. Pokud je rozptyl menší než prahová hodnota, jsou body klasifikovány jako součást fixace; v opačném případě jsou přiřazeny k sakádě (Komogortsev a kol., 2010). Správné nastavení parametrů těchto algoritmů je klíčové, protože výsledná identifikace fixací a sakád může být na zvolených prahových hodnotách citlivá (Popelka, 2024). Pro kartografické studie byly optimální parametry algoritmu I-DT experimentálně navrženy například ve studii Popelky (2014).

Z hlediska interpretace map a rozhraní je navíc relevantní, že vizuální pozornost může být přesouvána i bez odpovídajícího pohybu očí (tzv. *covert attention*). Tato skutečnost patří mezi klasické argumenty, proč nelze eye-tracking chápat jako „přímé čtení myšlení“, ale spíše jako

vysoce informativní behaviorální stopu, jejíž význam je nutné vykládat v kontextu řešené úlohy a dalších typů dat (Montello, 2002).

4.3.3 Historický vývoj metody eye-tracking

Historie metody eye-tracking sahá **do konce 19. století**, kdy se výzkum očních pohybů rozvíjel v souvislosti se studiem čtení a vizuální percepce (Płużyczka, 2018). Jedny z prvních pokusů o zaznamenávání pohybů očí jsou spojovány s prací Javala (1878), který experimentoval se zařízením využívajícím **odraz zrcátka** připevněného k oku, jehož pohyb byl zaznamenáván na **fotografickou desku**. Ve stejném období byl rovněž zaveden pojem „**sakáda**“, který se dodnes používá pro označení rychlých přesunů pohledu mezi jednotlivými fixacemi. Pozdější experimenty se snažily tuto metodu dále zdokonalit – například Delabarre (1898) nahradil zrcátko **sádrovým kalíškem** umístěným na oku, jehož pohyb byl mechanicky zaznamenáván pomocí drátu. Tyto rané experimentální přístupy však byly značně invazivní a mechanicky omezující pro účastníky. Současně je třeba poznamenat, že historiografie tohoto období není zcela jednoznačná; některé pozdější interpretace Javalovy (1878) práce mohou být výsledkem zjednodušení či nepřesností v literatuře. Ranou fází výzkumu očních pohybů je proto vhodné chápat spíše jako období postupného formování metod a konceptů (Wade, 2010).

Na počátku 20. století došlo k významnému technologickému posunu. Dodge a Cline (1901) vyvinuli **fotografické zařízení** umožňující sledovat pohyby očí bez nutnosti přímého mechanického připevnění k oku (Obrázek 20, vlevo). Tento přístup výrazně snížil invazivnost měření a umožnil přesnější analýzu bodů, na které se pozorovatel během vizuální inspekce soustředí. Technologický pokrok postupně otevřel prostor pro nové výzkumné otázky týkající se vztahu mezi očními pohyby, percepcí a kognitivním zpracováním vizuálních informací.

Ve 20. století se výzkum očních pohybů dále rozšířil mimo oblast čtení, například na studium vizuální inspekce obrazů a komplexních scén. V této souvislosti bývá často připomínána práce Buswella (1935), který systematicky analyzoval pohyby očí při **pozorování obrazů** a dalších komplexních vizuálních podnětů (Tinker, 1936) (Obrázek 20, vpravo). Jeho studie ukázaly, že vizuální pozornost pozorovatelů není náhodná, ale vykazuje určité vzorce související se strukturou a významem sledovaného obrazu, což představovalo důležitý krok k empirickému studiu vizuální pozornosti (Wade, 2020).



Obrázek 20: Ukázka eye-trackerů Dodge a Cline (1901) (vlevo) a Buswella (1935) (vpravo) (zdroj: Tatler a kol. (2019)).

Dalším významným mezníkem byla série experimentů **Yarbusova typu** (Yarbus, 1967), v nichž bylo prokázáno, že **instrukce a řešená úloha** mohou výrazně **ovlivnit rozložení fixací** na sledovaném obrazu. Tyto experimenty se staly klasickým argumentem ve prospěch tvrzení, že oční pohyby nejsou určovány pouze vlastnostmi vizuálního stimulu, ale významně je formují i kognitivní faktory související s cílem pozorování.

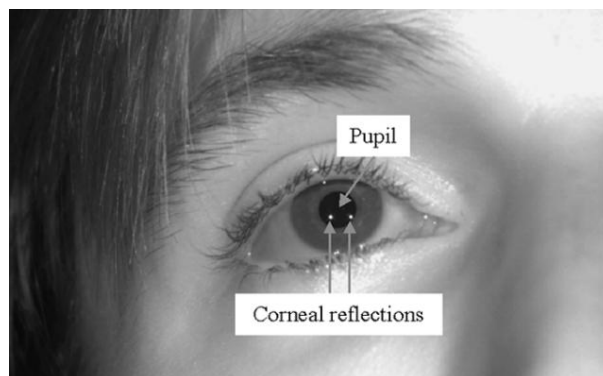
V oblasti testování použitelnosti patří mezi rané aplikace například studie z roku 1950 zaměřená na analýzu pohybů očí **pilotů pomocí filmové kamery** (Jacob a Karn, 2003; Ooms a kol., 2012a). Tyto experimenty ukázaly potenciál sledování pohledu pro studium vizuálního chování v komplexních úlohách a otevřely cestu k širšímu využití metody v aplikovaném výzkumu.

V kartografii se eye-tracking začal výrazněji uplatňovat v návaznosti na rozvoj uživatelsky orientovaných a kognitivních přístupů k mapě. V přehledové historické perspektivě je za průlomový moment často považována práce Jenkse (1973) z počátku 70. let, která ukázala potenciál sledování pohledu pro **studium čtení mapy**, například u bodových map a tendence pozorovatelů soustřeďovat se na informačně husté oblasti. V 70. letech proto počet kartografických eye-tracking studií narůstal, avšak v následujících dekáдах došlo k jeho poklesu. V literatuře je tento vývoj vysvětlován zejména technologickými omezeními tehdejších zařízení, náročností zpracování dat a metodologickými nejistotami při interpretaci výsledků (Jacob a Karn, 2003; Krassanakis a Cybulski, 2021; Montello, 2002; Rayner, 1998).

Zlom ve znovuoživení metody eye-tracking v kartografii nastal **na přelomu tisíciletí**, kdy se technologie stala dostupnější, méně invazivní a metodologicky stabilnější. Moderní video-based eye-trackery umožnily **přesnější a komfortnější** záznam pohledu participantů a současně usnadnily zpracování a vizualizaci dat. Díky tomu se metoda začala znovu využívat jak pro výzkum kognitivních procesů při čtení mapy, tak pro aplikovanou evaluaci mapových produktů a rozhraní. V kartografii se v této fázi objevují studie zaměřené například na použitelnost topografických map nebo na kombinaci eye-trackingu s dalšími metodami sběru dat, jako je think-aloud metoda (Brodersen a kol., 2001; Çöltekin a kol., 2009). Dnes je eye-tracking považován za efektivní bezkontaktní metodu umožňující analyzovat vizuální chování participantů během řešení definované experimentální úlohy (Ooms a kol., 2012a).

4.3.4 Technologie a typy eye-trackerů

Současné systémy pro eye-tracking jsou nejčastěji založeny na obrazovém **snímání oka** pomocí **videookulografie**, často v kombinaci s **infračerveným osvětlením** a výpočetním zpracováním obrazu. V metodologické literatuře se přitom rozlišuje několik základních principů měření očních pohybů. Duchowski (2007) uvádí například elektrookulografii, systémy založené na sklerálních kontaktních čočkách, fotookulografii, videookulografii či metody sledující vztah mezi zornicí a odrazy na rohovce. První tři přístupy jsou primárně zaměřeny na měření polohy oka vzhledem k hlavě, zatímco metoda založená na **vztahu zornice a rohovkového odrazu** (*pupil–corneal reflection*, P-CR) umožňuje odhadnout orientaci oka v prostoru a určit tak tzv. **bod pohledu** (*point of regard*) (Young a Sheena, 1975) – **Obrázek 21**.



Obrázek 21: Ukázkový snímek oka zobrazující zornici a dva odrazy rohovky (tzv. *glints*)
(zdroj: Guestrin a Eizenman (2006)).

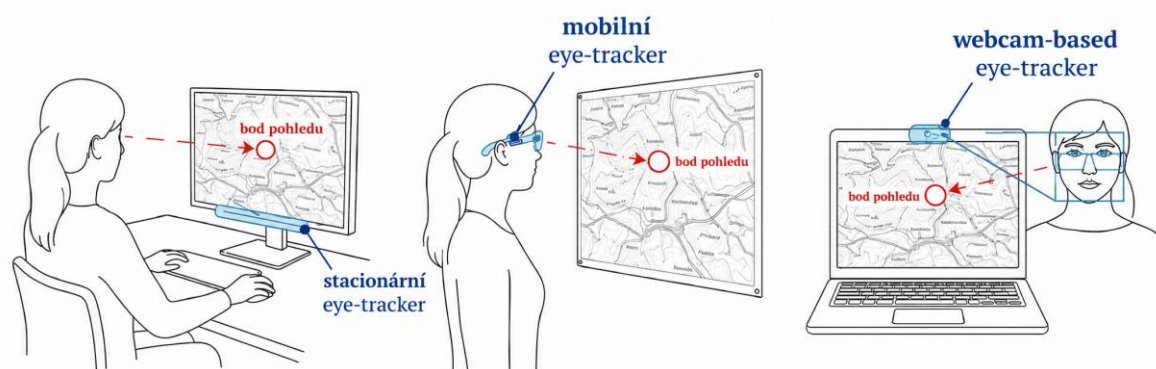
V současné době jsou v oblasti výzkumu člověk–počítač a kartografie téměř výhradně využívány **P-CR systémy** založené **na videu** (*video-based ET*). Tento přístup byl zaveden již v 60. letech (Merchant, 1967) a využívá **infračervené iluminátory** a **vysokorychlostní kameru**, která zaznamenává **obraz oka účastníka**. Algoritmus následně analyzuje relativní polohu středu zornice a jednoho či více odrazů infračerveného světla na rohovce. Ze vzájemné geometrie těchto bodů je po kalibraci odhadován **směr pohledu vůči sledovanému stimulu** (Duchowski, 2013). Popularita této technologie souvisí především s její relativně vysokou přesností, dostupností komerčních zařízení a existencí sofistikovaného softwaru pro zpracování a vizualizaci dat.

Přestože většina současných eye-trackerů využívá stejný princip měření, mohou se výrazně lišit svým konstrukčním řešením a experimentálním využitím. V aplikační praxi lze (ve shodě s potřebami kartografického experimentu) rozlišit několik základních kategorií zařízení (**Obrázek 22**):

- ↳ **Stacionární** (*remote, stationary*) eye-trackery jsou umístěny před účastníkem, obvykle ve vazbě na monitor, kterém je prezentován experimentální stimul. Kamera a infračervené iluminátory jsou typicky integrovány do samostatného zařízení nebo do spodní části monitoru. Výhodou je relativně stabilní geometrie měření, dobrá opakovatelnost podmínek a vysoká vhodnost pro laboratorní hodnocení mapových rozhraní, kde je žádoucí kontrola stimulu i interakčních podmínek. Limitací bývá nižší ekologie pro situace, kdy uživatel běžně pracuje v pohybu nebo střídá prostředí (Duchowski, 2013).
- ↳ **Mobilní** (*head-mounted/wearable*) eye-trackery jsou integrovány do brýlí, přileb nebo jiných náhlavních systémů a pohybují se společně s hlavou účastníka. Kamery a infračervené iluminátory jsou v tomto případě součástí samotného zařízení, které participant nosí. Hlavní výhodou tohoto přístupu je možnost záznamu očních pohybů v přirozeném prostředí, tedy při skutečném pohybu a interakci s okolím. Mobilní eye-trackery jsou proto využívány například ve sportovním výzkumu (Kredel a kol., 2017), při analýze chování řidičů (Kircher, 2007) či pilotů, při studiu orientace v prostoru nebo při výzkumu chování návštěvníků v muzeích či obchodních centrech (Hummel a kol., 2021). V kartografii mohou být relevantní zejména pro scénáře navigace nebo používání map v terénu. Nevýhodou je však vyšší komplexita

vyhodnocení dat, protože sledovaný stimul není pevně definován a je nutné robustně mapovat bod pohledu do proměnlivého prostředí) (Kiefer a kol., 2017).

- ↳ **Webcam-based** eye-trackery představují novější přístup, který využívá běžné kamery integrované v notebooku, mobilním zařízení nebo externí webkameře a algoritmicky odhaduje směr pohledu bez specializovaného hardware. Tento přístup je atraktivní zejména pro online experimenty a studie s velkým počtem participantů, protože výrazně snižuje logistické i finanční bariéry jejich zapojení. Současně však přináší výrazně vyšší nejistotu měření, která je způsobena heterogenitou kamer, rozdílnými světelnými podmínkami, polohou hlavy nebo kvalitou kalibrace. Tyto faktory mohou významně ovlivnit přesnost dat, což je třeba zohlednit zejména v situacích, kdy je cílem analyzovat jemné vizuální rozdíly v mapových znacích nebo rozhraních (Papoutsaki a kol., 2016).



Obrázek 22: Princip stacionárního (vlevo), mobilního (uprostřed) a webcam-based (vpravo) eye-trackeru.

Z hlediska této disertační práce je důležité zdůraznit, že volba typu eye-trackeru není pouze technickou otázkou, ale **zásadním metodologickým rozhodnutím**. Použité zařízení přímo ovlivňuje míru kontroly nad experimentálním stimulem, ekologickou validitu experimentu, možnosti standardizace interakčních scénářů i typ výzkumných otázek, které lze v rámci studie legitimně formulovat (Kiefer a kol., 2017). Současně je třeba dodat, že eye-tracking technologie nachází uplatnění v širokém spektru oborů – od klinického výzkumu a diagnostiky neurologických poruch přes marketing a analýzu spotřebitelského chování až po didaktiku či návrh interaktivních systémů (Halszka a kol., 2017; Wedel a Pieters, 2008). V posledních letech se navíc eye-tracking stále častěji integruje i do systémů **virtuální reality**, kde je využíván například pro tzv. *foveated rendering*, tedy optimalizaci vykreslování obrazu podle aktuálního směru pohledu uživatele.

4.3.5 Eye-tracking v kartografii a ve studiích hodnocení použitelnosti

Literatura v kartografii v posledních letech stále častěji rámuje eye-tracking jako jednu z **hlavních empirických metod** pro studium použitelnosti map, zejména ve spojení s kognitivní kartografií a interaktivní geovizualizací. Přehledové práce ukazují, že doména se posunula od sporadických studií ke konsolidovanému výzkumnému proudu, který zahrnuje jak statické mapy (znaky, popisky, barevnost), tak dynamické a interaktivní mapové aplikace (Krassanakis a Cybulski, 2021).

Z historického hlediska je však důležité zdůraznit, že výzkum pohybů očí původně vznikl mimo oblast kartografie. Rané studie se soustředily především na **čtení textu** a později na vizuální zkoumání různých grafických podnětů, například **fotografií, reklam či ilustrací**. Výzkum se postupně rozšířil také na analýzu vizuálního zkoumání leteckých snímků, radarových obrazovek, rentgenových snímků nebo scén zaznamenaných z pohybujících se dopravních prostředků (Steinke, 1987). Jedny z prvních prací blízkých kartografii se týkaly interpretace leteckých snímků (Enoch, 1959).

Za důležitý milník pro využití eye-trackingu v kartografii je považováno sympozium *Influence of the Map User on Map Design*, které se konalo roku 1970 na Queen's University v Ontariu (Popelka, 2024). Psycholog **Leon Williams** zde prezentoval výsledky výzkumu vizuálního vyhledávání založeného na sledování pohybů očí (Williams, 1971). Tato prezentace inspirovala řadu kartografů k využití metody eye-tracking při studiu čtení map. Mezi nimi byl například **George Jenks**, který zdůrazňoval, že tato metoda umožňuje nahlédnout do kognitivních procesů čtenáře mapy a otevírá nové možnosti výzkumu v kartografii (Steinke, 1987).

Jenks následně se svými studenty realizoval experiment zaměřený na **proces regionalizace** v bodové mapě. Pomocí modifikované filmové kamery zaznamenával pohyby očí respondentů a rekonstruoval jejich trajektorii pohledu. Výsledky ukázaly výraznou variabilitu strategií čtení mapy mezi jednotlivými uživateli a současně naznačily, že pozornost bývá soustředěna především na oblasti s vyšší informační hustotou, zatímco méně výrazné části mapy jsou často přehlíženy (Jenks, 1973). Tato práce je obvykle považována za **první publikovaný kartografický výzkum využívající eye-tracking**.

Navzdory počátečnímu zájmu v 70. letech následoval v následujících desetiletích výrazný **útlum** tohoto výzkumného směru. Od poloviny 80. let až do počátku 21. století se v kartografii objevovalo jen velmi málo studií využívajících eye-tracking, což bylo způsobeno především technologickými omezeními tehdejších zařízení a také nedostatečně rozvinutým teoretickým rámcem (Steinke, 1987). K obnovení zájmu o tuto metodiku dochází až s nástupem moderních systémů videookulografie na přelomu tisíciletí.

Jednou z raných studií tohoto nového období byla práce Brodersena a kol. (2001), která zkoumala **použitelnost topografických map** kombinací měření pohybu očí, sledování pohybu hlavy a klasických metod testování použitelnosti, jako jsou think-aloud protokoly nebo polostrukturované rozhovory. Studie ukázala, že data o pohybech očí mohou poskytnout cenné informace o vztahu mezi vnímanou složitostí mapy a kognitivním chováním uživatelů.

Na tuto linii navázaly další experimentální studie. Irina Fabrikant a kol. (2008) například analyzovali práci uživatelů s mapovými „small multiples“ a představili koncept tzv. *inference affordance*, který doplňuje tradiční metriky použitelnosti, jako je přesnost řešení úloh nebo čas potřebný k jejich dokončení. Pro analýzu sekvencí pohledů využili metod inspirovaných bioinformatikou, čímž rozšířili metodologický aparát kartografického výzkumu.

V oblasti webových map se významnou studií stala práce [Alaçam a Dalcı \(2009\)](#), kteří porovnávali **použitelnost** několika tehdejších **online mapových služeb** (Google Maps, MapQuest, Yahoo Maps a Live Search Maps). Autoři ukázali, že různé návrhy ikon, pop-up oken či navigačních mechanismů mohou výrazně ovlivnit výkon uživatelů při řešení úloh. Současně se ukázalo, že zkušenosti uživatelů hrají důležitou roli při interpretaci mapového rozhraní.

Podobně [Çöltekin a kol. \(2009\)](#) kombinovali **tradiční metody testování** použitelnosti s **analýzou očních pohybů** při srovnání dvou online mapových rozhraní. Zatímco klasické metriky použitelnosti umožnily identifikovat základní problémy rozhraní, analýza pohledu poskytla hlubší vhled do **kognitivní zátěže uživatelů** a do **strategií**, které při práci s mapou používají.

Pro ilustraci širší kartografických aplikací metody eye-tracking lze uvést několik typových okruhů, které se v literatuře opakují. Tyto okruhy odpovídají také klasifikaci výzkumných témat identifikovaných v přehledových studiích (např. [Kiefer a kol. \(2017\)](#); [Wang a kol. \(2016\)](#)):

- ↳ **Vliv kartografického designu na čtení mapy:** Sem patří studie zaměřené na parametry čitelnosti map, například na vliv barevnosti, velikosti písma, umístění popisků nebo obecné principy kartografického zobrazení dat. Eye-tracking umožňuje sledovat strategie vizuálního prohledávání mapy a identifikovat momenty váhání či přepínání pozornosti mezi jednotlivými prvky mapové kompozice. Typickým příkladem jsou studie zabývající se rozmístěním popisků nebo vlivem barevného kontrastu na čitelnost map ([Brychtova a Coltekin, 2016](#); [Ooms a kol., 2012b](#)).
- ↳ **Rozdíly mezi skupinami uživatelů.** Další výzkumný směr se zaměřuje na rozdíly mezi experty a laiky nebo mezi různými typy uživatelů map. Studie ukazují, že zkušenosti a odborné znalosti mohou významně ovlivnit strategie čtení mapy i efektivitu řešení úloh ([Fabrikant a kol., 2010](#); [Ooms a kol., 2012a](#); [Stofer a Che, 2014](#)). Tyto poznatky jsou důležité zejména pro návrh map určených široké veřejnosti.
- ↳ **Animované a dynamické mapy:** U animací se eye-tracking využívá jak k otázkám „co přitahuje pozornost“ (např. časování změn nebo použití dynamických vizuálních proměnných), tak i k otázkám „jak je animace pochopena“. Dynamická povaha těchto stimulů však komplikuje analýzu, protože relevantní informace se v průběhu času mění a standardní nástroje pro analýzu eye-tracking dat často nejsou pro dynamické podněty plně přizpůsobeny ([Dong a kol., 2014b](#); [Krassanakis a kol., 2016](#); [Opach a kol., 2014](#)).
- ↳ **Interaktivní mapy a webové mapové navigační schéma:** Výzkum se stále častěji zaměřuje také na interaktivní mapová rozhraní, jejichž význam výrazně vzrostl s rozšířením webových a mobilních technologií ([Mendonça a Delazari, 2014](#)). U těchto systémů uživatel aktivně mění stav zobrazení (např. posunem mapy nebo změnou měřítka), a tím se dynamicky mění i zobrazovaný obsah. Proto je při analýze pohledu nezbytné zaznamenávat také uživatelské interakce a synchronizovat je s eye-tracking daty ([Ooms a kol., 2015](#)). Studie například porovnávaly různé navigační mechanismy webových map nebo analyzovaly vliv designu rozhraní na úspěšnost řešení úloh ([Çöltekin a kol., 2009](#); [Manson a kol., 2012](#)). Více o studiích s interaktivními mapami je popsáno v podkapitole 4.2.3 a kapitole 5.

- ↳ **Koordinované a vícekomponentní rozhraní pro vizualizaci:** Další oblastí výzkumu jsou vizualizační nástroje kombinující více typů zobrazení, například mapu, grafy a tabulky – mapové dashboards. Eye-tracking zde umožňuje analyzovat rozdělení vizuální pozornosti mezi jednotlivými komponenty a sledovat strategie integrace informací. Studie ukazují, že i když více vizuálních komponent může zvyšovat kognitivní náročnost, uživatelé často oceňují flexibilitu, kterou takové nástroje poskytují (Golebiowska a kol., 2017; Porti Suarez a Popelka, 2024).

Pro rámec „současného stavu“ této kapitoly je podstatné, že kartografická komunita dnes disponuje více přehledovými syntézami, které mapují vývoj tématu, metodologické výzvy i výzkumné trendy. Eye-tracking v kartografii je výrazně **interdisciplinární** a propojuje poznatky z psychologie, počítačové vědy, vizuální analytiky a studia použitelnosti (Wang a kol., 2016). Vedle přehledů zaměřených přímo na kartografii se současně objevují práce, které eye-tracking zasazují do **širšího metodologického portfolia** hodnocení použitelnosti map a uživatelské zkušenosti (Krassanakis a Cybulski, 2021).

4.3.6 Kombinace eye-tracking metody s dalšími metodami

Eye-tracking poskytuje detailní **behaviorální data** o průběhu vizuální inspekce, ale sám o sobě typicky nepostačuje k vysvětlení motivů, strategií a interpretací uživatele. Z tohoto důvodu je v metodologické literatuře HCI i v kartografických studiích dlouhodobě zdůrazňována potřeba **kombinovat eye-tracking s dalšími metodami** – například s metodami, kdy participant mluví během experimentu nahlas, s retrospektivními rozhovory či s dotazníky. Taková kombinace odpovídá principu **mixed research approach**, kdy se propojují kvantitativní a kvalitativní datové zdroje tak, aby se zvýšila vysvětlovací síla závěrů a snížilo riziko jednostranné interpretace (Çöltekin a kol., 2009).

V kartografii je tento princip dobře patrný zejména u studií hodnotících použitelnost interaktivních mapových rozhraní, kde samotné výkonové metriky (čas/úspěšnost) často odhalí „že“ je něco problematické, zatímco eye-tracking může upřesnit „kde“ se problém realizuje (např. přehlédnutí ovládacího prvku), a kvalitativní data mohou vysvětlit „proč“ uživatel danou strategii zvolil. Právě tato **triangulace datových zdrojů** je v literatuře popisována jako přínosná pro evaluaci interaktivních map (Çöltekin a kol., 2009).

Z hlediska navazující praktické části disertace je tedy důležité chápat eye-tracking nikoli jako izolovanou metodu, ale jako část **metodického ekosystému hodnocení použitelnosti**, který propojuje (i) **výkon** uživatele při plnění úloh, (ii) **procesní data** o interakci a vizuální pozornosti a (iii) **subjektivní reflexi** uživatelské zkušenosti (Çöltekin a kol., 2009).

Specifikum interaktivních kartografických vizualizací spočívá v jejich „stavové“ povaze, kdy uživatel svými akcemi průběžně **mění obsah a měřítko** zobrazení, a tím i kontext, v němž je interpretováno, kam se dívá. Toto je klíčový rozdíl oproti statickým mapám, kde je stimul pro všechny účastníky v principu shodný. V důsledku toho je při eye-tracking studiích interaktivních map metodologicky zásadní řešit, **jak rekonstruovat vztah** mezi pohledem a skutečným geografickým obsahem v daném okamžiku (tj. „co bylo v místě pohledu právě zobrazeno“). Literatura proto zdůrazňuje význam **synchronizace záznamu** pohledu se **záznamem interakcí** (logování), zejména u webových map, kde jsou *pan* a *zoom* základními operacemi (Ooms a kol., 2015).

Pro tuto disertační práci je podstatné, že právě v oblasti interaktivních a dynamických map je eye-tracking metodika nejvíce výzkumně „napjatá“ – na jedné straně **roste relevance** (protože běžné mapové užití je dnes interaktivní), na straně druhé **roste analytická náročnost a riziko chybné interpretace**, pokud není experiment dostatečně promyšlen. Přehledové práce a metodologicky orientované studie proto upozorňují, že bez doplňkových dat (např. interakční logy) může být interpretace vizuální pozornosti u interaktivních map zavádějící (Ooms a kol., 2015).

Závěrem je vhodné shrnout, jaký typ přínosu má eye-tracking v rámci hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací v intencích této disertace: metoda umožňuje **zpřesnit porozumění procesu používání map** tím, že zachytí vizuální stránku dialogu člověk–mapa (tj. „na co se uživatel vizuálně zaměřuje“), a tím doplní výkonové a subjektivní ukazatele o procesní evidenci. Tento přínos se plně projeví zejména tehdy, pokud je eye-tracking metodologicky integrován do kombinovaného (*mixed*) výzkumného designu a pokud je respektována stavová a interakční povaha hodnocených mapových rozhraní (Montello, 2002). Také závěrem této kapitoly současného stavu je zřejmé, že problematika hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací, zejména s využitím metody eye-tracking, představuje **dynamicky se rozvíjející výzkumnou oblast** s rostoucím počtem empirických studií.

Při zpracování této rešeršní části práce se proto ukázala potřeba **systematičtěji zmapovat existující výzkum a analyzovat jej** z hlediska použitých metod, typů úloh, charakteru testovaných vizualizací i identifikovaných výzkumných mezer. Z tohoto důvodu byla v následující části práce realizována systematická identifikace a analýza relevantních studií podle metodologického rámce **PRISMA-ScR**, která přispívá k naplnění prvního dílčího cíle práce (DC1) a doplňuje tuto rešeršní část.

DC1

5 SYSTEMATICKÉ ZMAPOVÁNÍ STÁVAJÍCÍHO VÝZKUMU (DC1)

Tato kapitola disertační práce je věnována prvnímu dílčímu cíli se zaměřením na **systematické mapování relevantních odborných publikací** pro doplnění předchozí rešeršní části práce. V úvodní části je popsán proces systematického sběru literatury, jehož cílem je zajistit přehled existujících studií využívajících metodu eye-tracking k hodnocení použitelnosti IKV.

Na základě identifikovaných a analyzovaných publikací je vytvořen **strukturovaný přehled** výzkumných **přístupů**, použitých **metod** a hlavních **zjištění**. Tento přístup je zásadní pro doplnění rešeršní části studované problematiky, a také pro identifikaci potenciálních **výzkumných mezer**, přičemž umožňuje se vyvarovat potenciálním metodologickým chybám, optimalizovat design experimentů a zvolit nejvhodnější přístupy pro jejich realizaci. Výsledky této části práce tak tvoří klíčový **základ** pro empirickou část a přispívají k jeho celkové validitě. Systematický sběr literatury a tvorba přehledu relevantních studií souvisejících s tématem disertační práce byly provedeny s využitím principů metodiky **PRISMA-ScR** (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses for Scoping Reviews*) (Page a kol., 2021). Tento přístup byl částečně přizpůsoben specifikům výzkumu a dále inspirován tematickými studiemi zaměřenými na systematické přístupy k analýze literatury, například pracemi Chicase a Nielsena (2022) či Beitlové (2021). Hlavním cílem této metodologie je zajistit transparentní, reprodukovatelný a přesný postup pro vyhledávání, identifikaci a selekci relevantních zdrojů k danému tématu.

Metodika PRISMA zahrnuje kontrolní seznam s 27 položkami, které pomáhají zajistit plnohodnotný systematický přehled. Její základní princip lze zjednodušeně rozdělit do čtyř hlavních kroků, jak uvádějí Chicas a Nielsen (2022):

- ↳ **Identification** (identifikace) – vyhledání a shromáždění relevantních článků z různých databází a zdrojů.
- ↳ **Screening** (třídění) – první selekce článků na základě názvu a abstraktu, vyřazení irelevantních studií.
- ↳ **Eligibility** (posouzení relevance) – podrobná analýza obsahu a aplikace definovaných inkluzních a exkluzních kritérií.
- ↳ **Inclusion** (zařazení) – výběr finálního souboru článků pro následnou bibliografickou analýzu a kategorizaci zjištěných výsledků.

Použití této metodologie zajišťuje systematicčnost a objektivitu při výběru studií přispívající k vyšší kvalitě a validitě prováděného výzkumu. V první fázi byly nejprve zvoleny databáze **WoS**, **Scopus** a **ACM DL**, ve kterých byla **vyhledávány** relevantní publikace. Po shromáždění příslušných záznamů byla data exportována do lokálního prostředí Microsoft Excel a upravena (např. odstraněny duplikáty, sjednoceny formáty záznamů aj.). Následoval proces **třídění**, při kterém byly články posuzovány na základě **relevantnosti** podle názvu a abstraktu. V této fázi byly vyřazeny studie, které nesplňovaly základní kritéria. Poté byla provedena podrobnější **analýza** obsahu článků, kde se uplatnila předem stanovená kritéria zahrnutí a vyloučení. V závěrečné fázi byly vybrány relevantní studie do finálního souboru, který byl následně podroben analýze na základě stanovených výzkumných otázek. Tento postup tak zajistil systematický, transparentní a opakovatelný výběr zdrojů a jejich následnou analýzu.

★ [Q1] Kompletní DC1 byl v analogické podobě publikován v článku: **Vaníček, T., Vojtěchovská, M., & Popelka, S. (2026).** A scoping review of eye-tracking studies on the usability evaluation of interactive geovisualisations. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/10447318.2026.2618556>

👤 Tento DC1 byl také představen v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T., Popelka, S., Vojtěchovská, M. (2025).** Analýza eye-trackingových studií při hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací. Brno: 26. kartografická konference. In *Brno na mapách: tematický atlas moravské metropole mezi abstrakty 26. kartografické konference*. ISBN 978-80-11-07303-9.

5.1 Průzkum existujících přehledových studií

Před samotnou realizací systematického mapování studií bylo nezbytné ověřit, zda již v odborné literatuře (ne)existují **podobné systematické přehledy**, které by se věnovaly příbuznému tématu. Tato podkapitola 5.1 se proto zaměřuje na identifikaci a analýzu dosavadních přehledových studií týkajících se využití metody eye-tracking v kontextu kartografických vizualizací a hodnocení jejich použitelnosti.

Relevantní přehledové studie byly vyhledávány kombinací klíčových slov jako „eye-tracking“, „systematic review“, „scoping review“ a „map“, především prostřednictvím databáze **Google Scholar**. Celkem bylo identifikováno 17 studií, které se tematicky zaměřovaly na systematický průzkum eye-tracking experimentů v oblasti kartografických vizualizací. V následujícím textu jsou tyto **přehledy stručně představeny** s důrazem na jejich hlavní přínosy a metodologická východiska.

Krassanakis a Cybulski (2019) provedli **narativní tematický přehled studií** o metodě eye-tracking v kartografii, který zahrnoval 76 publikací z let 2009 až 2018, a rozdělili je do kategorií, jako jsou symbolizace (*symbolisation*), dimenzionalita (*dimensionality*), odborné znalosti uživatelů (*user expertise*) a analytické nástroje (*analysis tools*). Toto časové období odráží dobu, během které se metody sledování pohybu očí stále více uplatňovaly v kartografickém výzkumu; přehled však není systematický, a proto neposkytuje reprodukovatelný výběr studií ani kritické hodnocení. Tento přehled je však relevantní proto, že představuje jediný předchozí pokus o syntézu kartografických studií sledování pohybu očí v daném měřítku. Jejich následná studie (**Krassanakis a Cybulski, 2021**) měla formu **perspektivního článku**, který shrnul nejnovější vývoj v oblasti sledování pohybu očí v kartografii a nastínil budoucí možnosti výzkumu. Na rozdíl od jejich narativního přehledu z roku 2019, tento článek nepoužil rozsáhlý recenzní rámec, ale zaměřil se především na trendy po roce 2019 a metodologické perspektivy. Přístup však nebyl systematický a jejich přehled nezahrnoval interaktivitu ani hodnocení použitelnosti. Přesto jsou zde obě studie uvedeny, protože ukazují, jak se tato oblast koncepčně posunula, aniž by se zabývala interaktivitou.

Fairbairn a Hepburn (2023) publikovali **konceptní narativní přehled**, který syntetizuje roli sledování pohybu očí v kartografii a nastiňuje metodologickou rozmanitost a kognitivní perspektivy v této oblasti. Ačkoli se jejich příspěvek dotýká témat souvisejících s použitelností, není koncipován jako systematický nebo jinak rozsáhlý přehled. Neposkytuje empirickou nebo

reprodukovatelnou syntézu studií využívajících sledování pohybu očí k hodnocení IKV. Je zde však zahrnut, protože nastiňuje koncepční rámec, ve kterém v současné době chybí empirická práce o interaktivitě.

V souvisejících, ale odlišných oblastech poskytuje několik oborově specifických syntéz cenné, ale omezené poznatky. [Lai a kol. \(2013\)](#) provedli **systematický přehled** literatury 113 studií sledování pohybu očí publikovaných v letech 2000 až 2012 v kontextu pedagogického výzkumu. Jejich analýza identifikovala sedm tematických oblastí souvisejících s kognitivními procesy v učení, včetně zpracování informací a návrhů výuky. Ačkoli je tato rešerše systematická co do rozsahu a metodologie, její zaměření leží mimo kartografii a nezabývá se hodnocením použitelnosti IKV. Tento přehled je zde zahrnut za účelem demonstrace, že systematická syntéza existuje v souvisejících oblastech, ale ne přímo v kartografii.

[Rovira \(2016\)](#) představil **narativní přehled literatury**, který syntetizuje 15 publikací vydaných v letech 2007 až 2014 o použití sledování pohybu očí při mapování pojmů, převážně v kontextu vzdělávání. Přehled poskytuje popisný přehled kvality výzkumu, viditelnosti a tematického zaměření. Nepoužívá však systematickou ani rozsáhlou metodologii a zůstává bez souvislosti s hodnocením použitelnosti IKV. Je však relevantní, protože ilustruje specifická omezení narativní syntézy nad rámec prostorových kontextů.

[Keskin a Kettunen \(2023\)](#) publikovali **narativní přehled současného stavu**, v němž zkoumají potenciál sledování pohybu očí a strojového učení pro adaptivní mapové systémy reagující na pohled uživatele, přičemž čerpají z literatury přibližně za posledních 25 let. Jejich příspěvek spíše nastiňuje koncepční možnosti v rámci GeoAI a adaptivních kartografických rozhraní, než že by syntetizoval empirické důkazy, a také nepředstavuje systematický nebo rozsáhlý přehled zaměřený na hodnocení použitelnosti IKV. Zahrnut je zde však proto, že zdůrazňuje nově vznikající výzkum adaptivních map bez empirického hodnocení použitelnosti.

[Scott a kol. \(2019\)](#) provedli **systematický kvantitativní přehled výzkumu** sledování pohybu očí v cestovním ruchu a pohostinství, přičemž nejprve identifikovali 102 publikací a pro analýzu vybrali 17 studií. Autoři použili obsahovou analýzu k zmapování dominantních tematických oblastí, jako je pozornost věnovaná informacím, vnímání reklamy a použitelnost webových stránek. Ačkoli je výběr protokolů systematický, přehled je specifický pro danou oblast a nezabývá se hodnocením použitelnosti IKV. Studie je zde citována za účelem ukázat, že systematické protokoly byly použity jinde, ale ne pro oblast IKV.

[Sharafi a kol. \(2015\)](#) provedli **systematický přehled literatury** zahrnující 36 studií publikovaných v letech 1990 až 2014, ve kterém zkoumali využití sledování pohybu očí v softwarovém inženýrství a kategorizovali výzkum podle metrik, artefaktů a kognitivních úkolů. Přehled se řídí pokyny [Kitchenhama \(2007\)](#) a poskytuje reprodukovatelnou evidenční základnu; jeho rozsah je však specifický pro danou oblast a nesouvisí s hodnocením použitelnosti IKV.

[Skoulas \(2023\)](#) vypracoval **narativní magisterskou práci**, ve které zhodnotil 98 studií publikovaných v letech 2006 až 2023, které se zabývaly širokým spektrem experimentálních metod v oblasti vnímání a kognice map, včetně sledování pohybu očí, EEG a fMRI. Ačkoli je tato práce tematicky v souladu s kartografickým výzkumem, nepoužívá systematický protokol pro hodnocení ani protokol pro vymezení rozsahu, a proto nesyntetizuje empirické poznatky o použitelnosti v interaktivních prostředích. Je však relevantní ji zde uvést, protože dokumentuje širší experimentálních technik, aniž by syntetizovala výsledky použitelnosti.

Podobně [Strzelecki \(2020\)](#) provedl **systematický přehled literatury** 56 empirických studií o sledování pohybu očí pro webové vyhledávače publikovaných v letech 2004 až 2019, navrhl dvanácti položkovou kódovací matici a nastínil změny v chování uživatelů spojené s vývojem rozhraní SERP. Navzdory své systematické metodologii zůstává přehled mimo prostorovou a kartografickou oblast a nezabývá se hodnocením IKV.

Technicky orientované průzkumy se zaměřují především na metodologické a taxonomické perspektivy, spíše než na syntézu empirických poznatků o použitelnosti. [Blascheck a kol. \(2014\)](#) publikovali nejmodernější studii, která čerpá z přibližně 90 publikací o vizualizačních technikách pro eye-tracking data, které pokrývají literaturu až do roku 2014. Studie navrhla taxonomii prostorových, časových a časoprostorových metod. Následný průzkum [Blascheck a kol. \(2017\)](#) tuto práci rozšířil o přezkum přístupů vizuální analýzy a technik zaměřených na interakci, aniž by ale přijali systematický výběrový protokol nebo se zaměřili na hodnocení použitelnosti. Dále [Kiefer a kol. \(2017\)](#) poskytli **narativní přehled** představující sledování pohybu očí v rámci prostorového vnímání a GIScience, v němž nastínil konceptní a technologický vývoj. Ovšem nesyntetizovali empirické důkazy z těchto studií. Nakonec [Novák a kol. \(2024\)](#) provedli **systematický přehled** 90 článků vybraných z původního souboru 1 988 záznamů, ve kterém zkoumali sledování pohybu očí, použitelnost a strojové učení v obecném kontextu UX. Navzdory své systematické metodologii se tento přehled ale nezabývá prostorovými nebo kartografickými aplikacemi.

Naopak **jiné zavedené disciplíny** přinesly vyspělé a strukturované přehledy o sledování pohybu očí. Patří mezi ně například **čtení** ([Rayner, 1998](#)), multimediální **učení** ([Alemdag a Cagiltay, 2018](#)), **marketing** a reklama ([Wedel a Pieters, 2008](#)) a **interakce člověka s počítačem** ([Jacob a Karn, 2003](#)). Tyto přehledy ilustrují výhody strukturované syntézy pro konsolidaci znalostí, ale nezohledňují specifické kognitivní a prostorové požadavky IKV.

V důsledku toho v kartografické komunitě stále **chybí specializovaná syntéza**, která by integrovala interaktivitu, použitelnost a vizuální chování v prostorově dynamických prostředích. Z tohoto důvodu tato disertační práce v rámci DC1 vyplňuje tuto mezeru systematickou analýzou průnikem do tří klíčových oblastí výzkumu: **sledování pohybu očí, interaktivity a hodnocení použitelnosti IKV**. Na rozdíl od předchozích přehledů, které se těmito oblastmi zabývaly izolovaně nebo se zaměřovaly na statické mapové aplikace, jsou v rámci DC1 syntetizovány empirické poznatky, metodické postupy a analytické nástroje k posouzení toho, jak uživatelé interagují s dynamickými a interaktivními kartografickými rozhraními. Identifikací výzkumných trendů, metodických výzev a nedostatečně prozkoumaných oblastí přispívá tento přehled k hlubšímu pochopení IKV zaměřené na uživatele. Také nabízí praktické pokyny pro navrhování efektivnějších a intuitivnějších systémů založených na mapách.

5.2 Výzkumné otázky pro DC1

DC1 doplňuje dosavadní literaturu v oblastech kartografie, interakce člověk-počítač (HCI) a informační vědy. Navíc posouvá tuto oblast vpřed tím, že nabízí systematický základ pro budoucí výzkum na pomezí těchto disciplín. Získané poznatky mají význam pro akademické výzkumníky a odborníky z praxe, kteří se snaží navrhnout přístupnější, efektivnější a kognitivně přizpůsobené IKV.

Pro potřeby revize a poskytnutí strukturovaného přehledu literatury, bylo formulováno následujících **sedm výzkumných otázek (VO)**:

- ↳ **VO1:** Jaké mezery ve výzkumu jsou nejčastěji identifikovány v současné literatuře?
- ↳ **VO2:** Jaké typy IKV jsou v těchto studiích nejčastěji hodnoceny?
- ↳ **VO3:** Jaké techniky související s metodou eye-tracking jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?
- ↳ **VO4:** Jaké typy úkolů jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?
- ↳ **VO5:** Kolik participantů je obvykle rekrutováno do eye-tracking studií pro IKV a jaké jsou jejich charakteristiky?
- ↳ **VO6:** Jaké praktické aplikace mají výsledky eye-tracking studií v reálných scénářích?
- ↳ **VO7:** Jak se v průběhu času vyvíjely výzkumné eye-tracking přístupy při hodnocení použitelnosti IKV?

Tyto otázky tvoří analytickou strukturu tohoto přehledu a slouží jako podklad pro uspořádání výsledků prezentovaných v následujících částech.

5.3 Identifikace studií (*identification*)

Pro systematické vyhledávání byly využity tři centrální databáze: **Web of Science (WoS)**, **Scopus** a **ACM Digital Library**. Byla také použita technika sněhové koule, aby byly zahrnuty další relevantní studie citované v seznamech odkazů již identifikovaných publikací. Strategie vyhledávání byla založena na kombinaci pečlivě vybraných klíčových slov. Korektní volba klíčových slov byla zásadní pro další práci. Jejich prvotní volba proběhla jednoduchým členěním názvu práce (**Obrázek 23**).



Obrázek 23: Dělení názvu disertační práce pro výběr klíčových slov.

Zpracována byla i různá synonyma originálních slov z názvu disertační práce. Konkrétní volba klíčových slov pak byla ovlivněna **výsledným počtem** a také **relevantností** nalezených záznamů, tzn. v průběhu vyhledávání byla slova různě upravována, dokud nebylo zajištěno optimálního počtu publikací relevantních tématu. K strukturování dotazů v každé databázi byla použita pokročilá syntaxe vyhledávání a booleovské operátory. Vyhledávání bylo omezeno na

publikace v **anglickém jazyce**, přičemž byly zohledněny pouze recenzované publikace. Veškeré výsledky této části byly zjišťovány **počátkem roku 2025** (tedy mladší publikace nejsou zahrnuty). Finální přehled klíčových slov ukazuje **Tabulka 2**.

Tabulka 2: Přehled klíčových slov pro vyhledávání v databázích

hodnocení použitelnosti	<i>usability, usability evaluation, usability testing, heuristic, user experience, UX, user-centered design, UCD, human-computer interaction, HCI</i>
interaktivita	<i>interactivity, interactive, user interaction, HCI interaction, dynamism, dynamic</i>
kartografické vizualizace	<i>cartography, cartographic, map, geovisualization, geovisualisation, visualization, visualisation</i>
eye-tracking	<i>eye-tracking, eye tracking, gaze, fixation, saccades</i>

5.3.1 Web of Science (WoS)

Databáze **Web of Science (WoS)** umožňuje systematické vyhledávání odborných publikací prostřednictvím pokročilého dotazovacího jazyka. Tento přístup umožňuje přesnou specifikaci vyhledávacích kritérií a jejich kombinaci pomocí logických operátorů. Pro identifikaci relevantních studií v této práci byl použit následující dotaz:

```
(TS=(usability) OR TS=(heuristic) OR TS=(user experience) OR TS=(UX) OR TS=(user-centered design) OR
TS=(UCD) OR TS=(human-computer interaction) OR TS=(HCI) OR TS=(usability testing) OR TS=(usability
evaluation))
AND
(TS=(interactivity) OR TS=(interactive) OR TS=(user interaction) OR TS=(HCI interaction) OR
TS=(dynamism) OR TS=(dynamic))
AND
(TS=(cartography) OR TS=(cartographic) OR TS=(map) OR TS=(geovisualization) OR TS=(geovisualisation)
OR TS=(visualization) OR TS=(visualisation))
AND
(TS=(eye-tracking) OR TS=(eye tracking) OR TS=(gaze) OR TS=(fixation) OR TS=(saccades))
```

Vyhledávací dotaz byl strukturován tak, aby zahrnoval čtyři hlavní tematické okruhy: hodnocení použitelnosti, interaktivitu, kartografické vizualizace a eye-tracking. Tyto okruhy byly propojeny operátorem *AND*, čímž bylo zajištěno, že vyhledané studie obsahují klíčová slova ze všech uvedených kategorií. V rámci každého tematického okruhu byla klíčová slova propojena operátorem *OR*, což umožnilo zahrnout různé termíny a jejich varianty (např. "visualization" a "visualisation"), aby byl pokryt širší soubor relevantních publikací. Vyhledávání bylo aplikováno v rámci *Web of Science Core Collection*, přičemž články byly identifikovány na základě jejich názvu, abstraktu nebo klíčových slov.

Celkem bylo nalezeno **316 záznamů** publikovaných mezi lety 1999 až 2025. Následně byla provedena tematická selekce výsledků, přičemž byly ponechány pouze publikace spadající do tematických oblastí: *Geography, Physical Geography, Remote Sensing, Computer Science, Information Science Library Science*. Po aplikaci těchto filtrů byl konečný počet redukován na **239 záznamů**.

5.3.2 Scopus

Vyhledávání v databázi **Scopus** bylo realizováno stejným postupem jako v případě WoS, přičemž vyhledávací dotaz odpovídal následující struktuře:

```
(TITLE-ABS-KEY(usability) OR TITLE-ABS-KEY(heuristic) OR TITLE-ABS-KEY(user experience) OR TITLE-ABS-KEY(UX) OR TITLE-ABS-KEY(user-centered design) OR TITLE-ABS-KEY(UCD) OR TITLE-ABS-KEY(human-computer interaction) OR TITLE-ABS-KEY(HCI) OR TITLE-ABS-KEY(usability testing) OR TITLE-ABS-KEY(usability evaluation))
AND
(TITLE-ABS-KEY(interactivity) OR TITLE-ABS-KEY(interactive) OR TITLE-ABS-KEY(user interaction) OR TITLE-ABS-KEY(HCI interaction) OR TITLE-ABS-KEY(dynamism) OR TITLE-ABS-KEY(dynamic))
AND
(TITLE-ABS-KEY(cartography) OR TITLE-ABS-KEY(cartographic) OR TITLE-ABS-KEY(map) OR TITLE-ABS-KEY(geovisualization) OR TITLE-ABS-KEY(geovisualisation) OR TITLE-ABS-KEY(visualization) OR TITLE-ABS-KEY(visualisation))
AND
(TITLE-ABS-KEY(eye-tracking) OR TITLE-ABS-KEY(eye tracking) OR TITLE-ABS-KEY(gaze) OR TITLE-ABS-KEY(fixation) OR TITLE-ABS-KEY(saccades))
```

Na základě tohoto dotazu bylo identifikováno **509 publikací** z období 1995 až 2025, přičemž vyhledávání bylo aplikováno na názvy článků, abstrakty a klíčová slova. Stejně jako v případě WoS byla provedena tematická selekce výsledků na základě vědních oblastí, přičemž byly ponechány publikace spadající do kategorií: *Computer Science, Engineering, Social Sciences, Psychology, Decision Sciences a Multidisciplinary*. Po aplikaci těchto filtrů byl konečný počet publikací snížen na **477 záznamů**.

5.3.3 ACM Digital Library

Vyhledávání v **ACM Digital Library** bylo realizováno obdobně, přičemž dotaz byl přizpůsoben syntaxi této databáze:

```
("usability" OR "heuristic" OR "user experience" OR "UX" OR "user-centered design" OR "UCD" OR "human-computer interaction" OR "HCI" OR "usability testing" OR "usability evaluation")
AND
("interactivity" OR "interactive" OR "user interaction" OR "HCI interaction" OR "dynamism" OR "dynamic")
AND
("cartography" OR "cartographic" OR "map" OR "geovisualization" OR "geovisualisation" OR "visualization" OR "visualisation")
AND
("eye-tracking" OR "eye tracking" OR "gaze" OR "fixation" OR "saccades")
```

Vyhledávání bylo provedeno v několika různých kategoriích, přičemž počet nalezených záznamů se lišil podle zvolené oblasti:

- ↳ **Tituly článků:** 0 záznamů,
- ↳ **Abstrakty:** 11 záznamů,
- ↳ **Plné texty:** 5 420 záznamů.

Vzhledem k velkému množství záznamů identifikovaných v plných textech bylo rozhodnuto ponechat pouze studie nalezené v rámci **abstraktů**, které jsou obvykle více zaměřené na relevantní tematiku. Konečný počet relevantních publikací identifikovaných v ACM Digital Library činil tedy **11 záznamů**.

5.3.4 Jiné zdroje

Kromě systematického vyhledávání ve zmíněných databázích byly pro identifikaci studií využity i další zdroje. Tyto zdroje byly získávány především na základě **doporučení odborníků**, prohledávání **tematických konferencí a časopisů**, využití **nástrojů pro vyhledávání** propojených publikací a **metodou sněhové koule**.

Kromě tradičních akademických databází byly prohledávány také alternativní zdroje, jako je *Google Scholar*, který nabídl rozsáhlé množství potenciálně relevantních publikací. Nicméně, vzhledem k neomezenému objemu výsledků (čítajících desetitisíce záznamů) a absenci možnosti hromadného exportu, nebyly tyto publikace systematicky zahrnuty do analýzy.

Dalším využitým nástrojem byl *Connected Papers*, který umožňuje vizuálně identifikovat související studie na základě citačních vztahů. Metoda sněhové koule byla aplikována k vyhledávání dodatečných relevantních studií – identifikovány byly články citované v již získaných publikacích nebo doporučované na základě citačních vztahů v rámci WoS (například v sekci "*You may also like...*"). Tyto publikace byly následně posouzeny (převážně na základě titulů a abstraktů) a subjektivně začleněny či odmítnuty v závislosti na jejich relevanci vůči disertační práci. Celkově bylo tímto způsobem získáno **několik desítek** dalších relevantních materiálů, které však byly primárně využity **zpětně pro řešeršní část práce** (kapitola 4), nikoliv pro kvantitativní analýzu, jelikož většina studií již byla pokryta systematickým vyhledáváním ve WoS, Scopus a ACM Digital Library.

Dalším zdrojem informací byla databáze *Theses.cz*, která obsahuje závěrečné a absolventské práce z vysokých škol v České republice a na Slovensku. Vyhledávání bylo prováděno na základě klíčových slov definovaných v předchozí části. Po aplikaci různých variant klíčových slov a tematických filtrů byla identifikována pouze **jedna práce**, která se úzce vztahovala k tématu: **Štencek (2015) – Hodnocení interaktivní mapy s využitím eye-tracking testování**. Tato práce byla dále využita především jako inspirační zdroj v kontextu metodologie eye-tracking experimentů v kartografických vizualizacích.

Celkově bylo z jiných zdrojů identifikováno **17 relevantních publikací**.

5.4 Třídění studií (*screening*)

Z uvedených databází byly exportovány identifikované záznamy. Celkem bylo exportováno 239 záznamů z WoS, 477 záznamů z databáze Scopus a 11 z ACM, celkem tedy **727 záznamů**. Exportovány byly záznamy především s autory, tituly článků, zdroji titulu, titulu knižní série, typu dokumentu, abstrakty, počtu citací, roku publikace a DOI identifikátoru. Záznamy byly upraveny a integrovány do jednotného prostředí Microsoft Excel, kde každý řádek reprezentoval jeden článek s příslušnými atributy. Poté bylo použito nástroje pro automatické označení duplicit podle DOI a titulu. Označeno bylo **42 duplicitních záznamů** s identickým DOI nebo názvem. Zároveň byla aplikováno pravidlo, že upřednostňovány byly záznamy z WoS, dále Scopus a naposledy z ACM. Pokud například byla objevena duplicita mezi článkem z WoS a Scopus, byl ponechán ten z WoS. Zároveň bylo zjištěno, že všech 11 záznamů z ACM bylo duplicitních, proto s nimi nebylo dále počítáno. Zbývalo **685 záznamů**, u kterých proběhlo třídění podle názvu a abstraktu článku. Každému záznamu byl v rámci tohoto procesu přiřazen kód podle relevantnosti: **0** – irelevantní článek, **1** – nejistý článek, **2** – relevantní článek (**Obrázek 24**). Články s kódem 0 nebyly dále zvažovány. Články s kódem 1 byly dále hodnoceny podrobnějším posuzováním podle plného obsahu článku a dále zařazeny buď do kategorie

relevantních nebo irrelevantních. Tímto postupem bylo vybráno **62** relevantních článků pocházejících z databází *WoS* a *Scopus*.

SCREENING	ELIMINATION REASON	ELIGIBILITY	PDF	Authors	Article Title
526	0	0	0	McGrath L.S.	17th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, INTERACT 2019
527	0	0	0	Kim H.; Yi S.; Yoon	20th International Conference on HCI, HCI International 2018
528	0	0	0	Alam S.S.; Jianu R.	Exploring touch feedback display of virtual keyboards for reduced eye movements
530	0	0	2	Hajek J.; Unberath M.	Analyzing Eye-Tracking Information in Visualization and Data Space: From Where on the Screen to What on the Screen
531	0	0	0	Hotta K.; Prima O.D.	Closing the Calibration Loop: An Inside-Out-Tracking Paradigm for Augmented Reality in Orthopedic Surgery
532	0	0	0	Hotta K.; Prima O.D.	Compensatory Visual Field Training Based on a Head-Mounted Display Eye Tracker
533	0	0	0	Hu T.; Lv J.; Xie Q.	A novel human behaviour information coding method based on eye-tracking technology
534	0	0	2	Golebiowska I.; Opa	For your eyes only? Evaluating a coordinated and multiple views tool with a map, a parallel coordinated plot and a table using an eye-tracking approach
535	0	0	0	Khosravan N.; Celik	10th International Conference on Social Computing and Social Media, SCISM 2018 Held as Part of HCI International 2018
536	0	0	0	Khosravan N.; Celik	Gaze2Segment: A pilot study for integrating eye-tracking technology into medical image segmentation
537	0	0	2	Popelka S.; Herman	User evaluation of map-based visual analytic tools
538	0	0	0	Jha S.; Busso C.	Estimation of Gaze Region Using Two Dimensional Probabilistic Maps Constructed Using Convolutional Neural Networks
539	1	0	0	Peng N.; Xue C.; W.	Research on the effect of visual conventions on perception and inference
540	0	0	0	Raiha K.-J.; Sharmi	Gaze-contingent scrolling and reading patterns
541	0	0	0	Rozado D.; Niu J.; E	FaceSwitch - Low-cost accessibility software for computer control combining gaze interaction and face gestures
542	0	0	0	Nitschke C.; Nakaz	Coming imaging revisited: An overview of corneal reflection analysis and applications
543	0	0	0	Mamidi G.; Grewal	FAn eye tracker study to determine if a consistent web page layout improves user performance
544	0	0	0	Giannopoulos I.; Kie	Gaze nav: Gaze-based pedestrian navigation
545	2	2	2	Hupont I.; Baldassa	The emotracker: Visualizing contents, gaze and emotions at a glance
546	1	0	0	Hupont I.; Baldassa	The emotracker: Visualizing contents, gaze and emotions at a glance
547	0	0	0	Nisforou E.A.; Mich	Using eye tracking to understand the impact of cognitive abilities on search tasks
548	2	2	2	MacLeod N.	Cultural routes, trails and the experience of place
549	1	0	0	Kerne A.; Webb A.	Using metrics of curation to evaluate information-based ideation
550	0	0	0	Brohi C.; Butzler J.	Icon design for older users of project management software
551	0	0	0	Walter R.; Bulling	A Analyzing visual attention during whole body interaction with public displays
552	0	0	0	Abioye A.O.; Prior	EThe multimodal edge of human aerobotic interaction
553	0	0	0	Almeida S.; Mealha	Video game scenery analysis with eye tracking
554	0	0	0	Raschke M.; Veloso	A video game level analysis model proposal
555	0	0	0	Raschke M.; Veloso	A video game level analysis model proposal
556	0	0	0	Hupont I.; Baldassa	Advanced human affect visualization
557	0	0	0	Tavakoli H.R.; Poost	Preliminary studies on personalized preference prediction from gaze in comparing visualizations
558	2	2	2	Gobel F.; Giannopoi	The importance of visual attention for adaptive interfaces
559	0	0	0	Paletta L.; Santner	3D Attention: Measurement of Visual Saliency Using Eye Tracking Glasses
560	0	0	0	Rakoczi G.; Pohl M.	Visualisation and analysis of multiuser gaze data: Eye tracking usability studies in the special context of e-learning
561	0	0	0	Mele M.L.; Millar D.	Beyond direct gaze typing: A predictive graphic user interface for writing and communicating by gaze
562	0	0	0	Kulshreshtha A.; La	Dynamic stereoscopic 3D parameter adjustments for enhanced depth discrimination

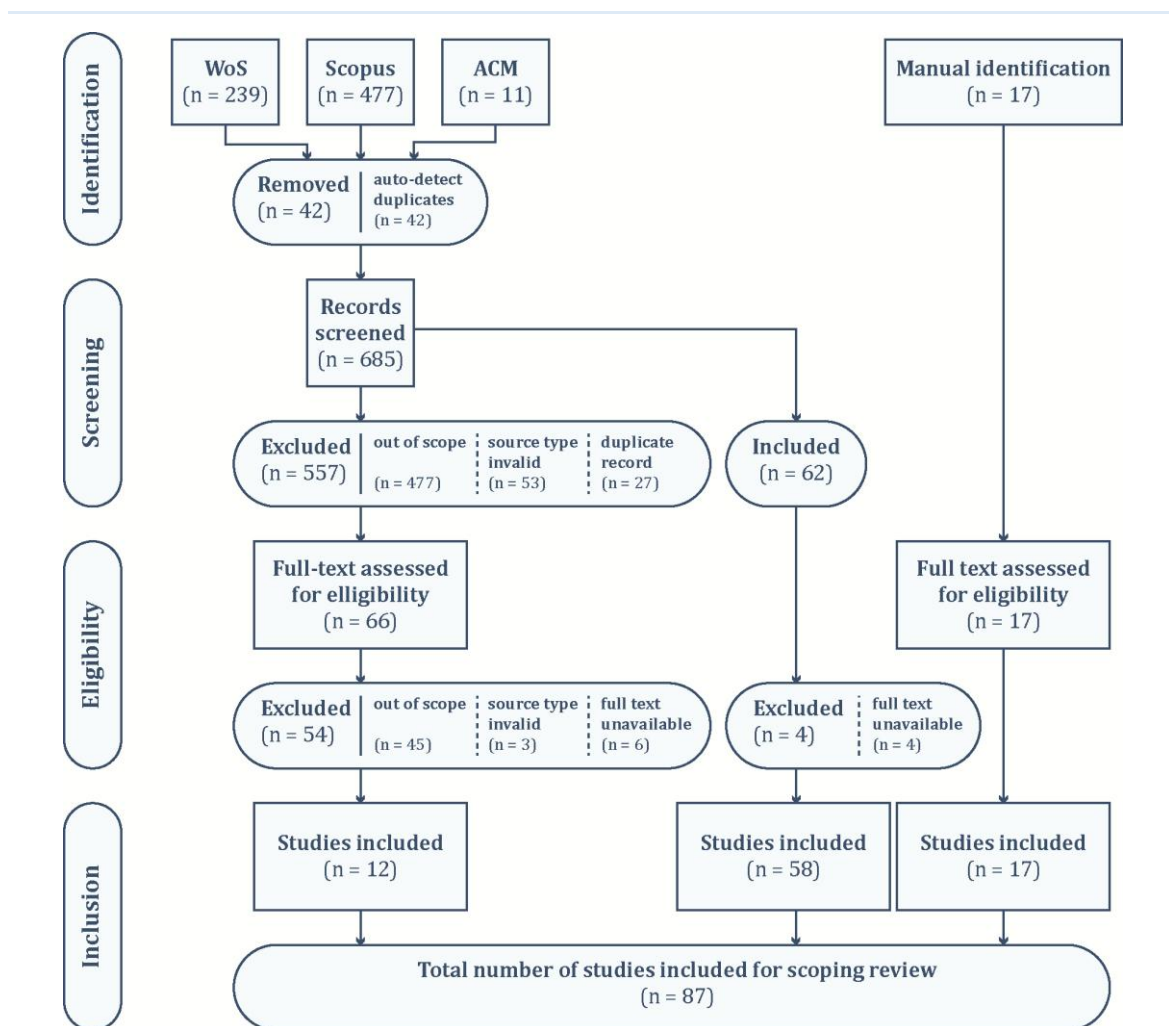
Obrázek 24: Příklad ručního kódování relevantnosti článků.

5.5 Posouzení relevance studií (eligibility)

Prvotním tříděním studií bylo eliminováno 557 irrelevantních záznamů na základě titulu nebo abstraktu. V případech, kdy však pouze titul a abstrakt nebyl dostatečný pro posouzení relevance, bylo přistoupeno k posouzení relevance studií na základě **plného textu** publikace. Zároveň do tohoto posuzování byly zařazeny i studie získané z jiných zdrojů. Celkově tak bylo posuzováno **66 článků** z předchozího třídění a **17 článků** získaných manuálně. Po posouzení relevance na základě plných textů článků bylo vyloučeno 54 studií z důvodu tematické irrelevantnosti (45×), nesouladu typu zdroje (3×) nebo nedostupnosti plného textu (6×) a další čtyři studie z ručně identifikovaného souboru byly vyloučeny z důvodu omezeného přístupu.

5.6 Začlenění studií (inclusion)

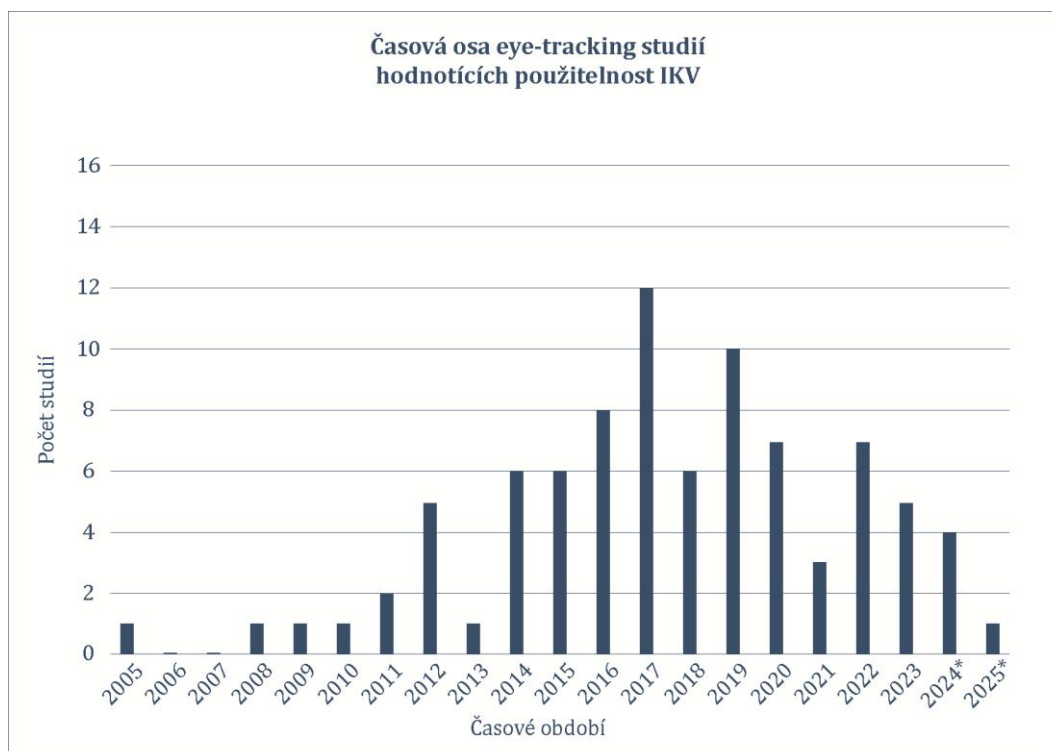
Celkový konečný soubor obsahoval **87 studií**. Posledním krokem bylo získávání plných textů těchto přijatých článků a jejich správa v jednom adresáři. Zároveň byla získána metadata pro potřeby správy v citačním manažeru. Celkový proces je znázorněn v diagramu (Obrázek 25).



Obrázek 25: PRISMA-ScR diagram znázorňující proces od identifikace až po začlenění studií.

Popis v obrázku je uveden záměrně v anglickém jazyce z důvodu zachování původní podoby PRISMA diagramu, který je mezinárodně uznávaným standardem pro systematické přehledy literatury. Anglická verze navíc usnadňuje srozumitelnost a porovnatelnost s dalšími studiemi publikovanými v mezinárodních vědeckých časopisech, kde je tento formát běžně používán.

Nejstarší identifikovaná studie byla publikována v roce 2005. Poté se počet relevantních studií začal zvyšovat po roce 2010 a vrcholu dosáhl v období 2016–2019 (**Obrázek 26**). Nejplodnějším rokem byl rok 2017, kdy bylo publikováno 12 studií. Tento vrchol může odrážet zvýšenou dostupnost technologií pro sledování pohybu očí a rostoucí zájem výzkumu o dynamická geovizualizační rozhraní. Pokles frekvence publikací po roce 2019 lze připsat narušením způsobeným pandemií COVID-19, včetně omezení experimentálního výzkumu a snížené dostupnosti participantů. Navzdory tomuto poklesu zůstává počet publikací v letech 2020 až 2025* (27 studií) relativně vysoký, což naznačuje, že tato oblast i nadále přitahuje pozornost výzkumníků.



Obrázek 26: Vývoj počtu eye-tracking studií hodnotících IKV.

Roky 2024 a 2025 jsou v obrázku označeny hvězdičkou (*), což znamená, že počet publikací pro tyto roky je prozatímní, protože se mohou objevit další studie.

5.7 Interaktivní tabulka s přehledem studií

Pro zlepšení přístupnosti a použitelnosti výsledků byla vytvořena **webová interaktivní tabulka**⁷, která shrnuje 87 zahrnutých studií (**Obrázek 27**). Tabulka obsahuje 11 sloupců, z nichž každý obsahuje podrobné informace o konkrétní studii. Čtyři sloupce udávají míru relevance pro konkrétní témata: hodnocení použitelnosti, interaktivita, geovizualizace a sledování pohybu očí pomocí pětibodové stupnice (1 = nízká relevance, 5 = vysoká relevance). Hodnocení relevance bylo přiděleno na základě odborného posouzení autorem disertační práce. Další sloupce poskytují informace o použitých metodách, experimentálním designu, typech úkolů a počtu participantů. Významnou výhodou interaktivního prostředí jsou jeho filtrační schopnosti, které čtenářům tabulky umožňují zobrazit pouze studie, které jsou nejrelevantnější pro jejich výzkumné zájmy.

⁷ *Scoping Review of Eye-tracking Studies on Usability of Interactive Geovisualisations: Research Database* [online]. 2026 [cit. 2026-05-20]. Dostupné z: <https://et-geovis-review.netlify.app/>

Study & Article Title	Experiment	Participants	Usability	Interactivity	Geovis	Eye Tracking	Main Methods	Experiment Design	Eye-tracking Dev
Alam et al. (2017) Analysing Eye-Tracking Information in Visualization and Data Space: From Where on the Screen to What on the Screen	Yes	9					eye-tracking	Within-subjects design	Tobi EyeK
Almahmoud et al. (2017) Visual Exploration Patterns in Information Visualizations: Insights from Eye Tracking	Yes	25					Eye-tracking combined with retrospective think-aloud protocol	Within-subjects design	Tobi XT20
Anagnostopoulos et al. (2017) Gaze-informed location-based services	Yes	5					Eye-tracking integrated with computer vision techniques for real-time gaze-to-object mapping in outdoor environments	Proof-of-concept experiment and performance evaluation	SMI Eye Tracking Glasses v1.5
Bartling et al. (2019) A multi-national human-computer interaction evaluation of the public participatory GIS GeoCitizen	Yes	73					Eye-tracking combined with a qualitative survey and observational analysis Usability metrics evaluated: effectiveness, efficiency, and satisfaction	Between-subjects design	Not specified
Bartling et al. (2021) Evaluating PPGIS Usability in a Multi-National Field Study Combining Qualitative Surveys and Eye-Tracking	Yes	73					Eye-tracking combined with a qualitative survey, observational analysis, and think-aloud protocol Usability metrics evaluated: effectiveness, efficiency, and satisfaction	Between-subjects design	Dikablis Professional Eye-Track
Bekele (2019) Walkable Mixed Reality Map as interaction interface for Virtual Heritage	Yes	NaN					User Interaction Analysis Observational analysis and qualitative feedback	Proof-of-concept implementation and evaluation with user observations	Not applicable

Obrázek 27: Náhled na interaktivní tabulku s analyzovanými studiemi.

5.8 Rozbor studií na základě výzkumných otázek (VO1–VO7)

Kromě interaktivní tabulky bylo všech 87 studií podrobena **hloubkové analýze** podle sedmi předem definovaných **výzkumných otázek** (VO1–VO7), z nichž každá se zabývala konkrétním aspektem nezbytným pro komplexní pochopení hodnocení použitelnosti interaktivních geovizualizací.

5.8.1 VO1: Jaké mezery ve výzkumu jsou nejčastěji identifikovány v současné literatuře?

Systematický přehled studií odhalil několik opakujících se mezer ve výzkumu a metodologických omezení, která omezují robustnost, zobecnitelnost a praktickou použitelnost současných zjištění. Tyto mezery, které často přímo uznávají i autoři studií v diskusních částech, poukazují na možnosti dalšího rozvoje v této oblasti. Zatímco jednotlivé studie se obvykle zaměřují na konkrétní vizualizace nebo případy použití, z literatury vyplynulo několik průřezových témat, která společně poukazují na potřebu rozmanitějších, realističtějších a metodologicky konzistentnějších výzkumných postupů.

Jednou z nejčastěji zmiňovaných mezer je **omezená obecná platnost výsledků** studií pro širší skupiny uživatelů nebo scénáře v reálném světě. Mnoho studií uvádí, že jejich zjištění jsou úzce spjata se specifickými vizuálními podněty a kontexty, které jsou předmětem výzkumu, což ztěžuje extrapolaci závěrů mimo tyto podmínky (Alam a Jianu, 2017; Almahmoud a kol., 2017; Bartling a kol., 2019; Brady a kol., 2018). Kromě toho jsou vzorky účastníků obvykle homogenní, často se skládají z vysokoškolských studentů nebo odborníků z konkrétních oborů (Brady a kol., 2018; Burch, 2018; Opach a Nossam, 2011) s omezenou demografickou a zkušenostní rozmanitostí. Většina účastníků má podobný věkový profil, vzdělání nebo úroveň technologické zdatnosti. Jen málo studií výslovně zahrnuje starší dospělé, děti nebo osoby se zdravotním postižením, a ještě méně studií zkoumalo, jak tyto rozdíly ovlivňují interakci s IKV (Buddeberg a kol., 2017; Horbinski a kol., 2020; Juřík a kol., 2016). Tato nedostatečná reprezentace je obzvláště problematická vzhledem k rostoucímu důrazu na inkluzivní design a přístupnost v mapových aplikacích určených pro veřejnost. **Rozšíření**

diverzity participantů by zvýšilo externí validitu zjištění a pomohlo identifikovat jedinečné výzvy v oblasti použitelnosti, kterým čelí nedostatečně zastoupené skupiny uživatelů.

Další často zmiňovanou mezerou je **absence longitudinálního výzkumu**, který by zkoumal, jak se uživatelé přizpůsobují IKV a jak s nimi interagují po delší dobu. Většina zkoumaných studií se opírala o jednorázové experimentální sezení, která často netrvala déle než hodinu. Výsledkem je, že poskytují pouze momentální snímek chování uživatelů a nedokážou zachytit vývoj interakčních strategií, efekty učení anebo i únavu v průběhu času. Studie, jako jsou například studie [Bianconi a kol. \(2022\)](#), [Dong a kol. \(2018\)](#) a [Popelka a kol. \(2022\)](#) zdůrazňují potřebu výzkumu, který sleduje uživatele v rámci více sezení nebo reálných nasazení. Longitudinální studie by mohly poskytnout bohatší poznatky o tom, jak opakovaná expozice nebo reálné použití formuje chování uživatelů a výsledky použitelnosti ([Qiao a Wu, 2024](#); [Siirtola a Riih , 2011](#)).

Dalším metodologickým omezením je **integrace a analýza multimodálních dat**, jako je kombinace sledování pohybu očí s verbalizačními metodami, se záznamy chování nebo s fyziologickými signály. Na druhou stranu několik studií, které využívaly metody think-aloud nebo rozhovory po dokončení úkolu, popsalo synchronizaci těchto datových toků s metrikami sledování pohybu očí jako pracné a špatně automatizované ([Bekele, 2019](#); [Blascheck a kol., 2016a](#); [Herman a kol., 2017](#)). Nedostatek standardizovaných nástrojů a postupů pro multimodální analýzu zůstává překážkou pro komplexnější interpretaci uživatelské zkušenosti. Pokroky v této oblasti by mohly umožnit jemnější analýzy, zejména ve scénářích zahrnujících složité rozhodování nebo společné používání map.

Další významnou mezerou zjištěnou v různých studiích je **absence standardizovaných hodnotících metrik**. Ačkoli studie často uvádějí základní ukazatele založené na pohledu, jako je doba fixace nebo počet sakád, výběr a interpretace těchto metrik se značně liší. Jen málo studií výslovně odůvodňuje výběr svých metrik nebo je spojuje s teoretickými modely vizuální pozornosti nebo použitelnosti ([Saint-Marc a kol., 2017](#)). Absence dohodnutých referenčních hodnot brání srovnání mezi studiemi a hromadění kumulativních znalostí v této oblasti. Navíc neexistuje shoda ohledně integrace eye-tracking dat s doplňkovými metodami, jako jsou dotazníky použitelnosti nebo měření kognitivní zátěže ([Fairbairn a Hepburn, 2023](#); [Siirtola a Riih , 2011](#)).

V konečném důsledku představuje **převaha laboratorních experimentů** významné omezení současných výzkumných postupů. Ačkoli kontrolované laboratorní podmínky umožňují přesná měření, nemusí přesně odrážet způsob, jakým uživatelé interagují s IKV v reálném prostředí. Několik autorů ([Demšar a   ltekin, 2017](#); [Deng a kol., 2023](#); [Kiefer a kol., 2017](#)) poznamenává, že výsledky získané ze studií prováděných na stolních počítačích se často liší, když jsou replikovány v mobilních nebo terénních podmínkách. Jen málo studií zahrnuje testování v mobilním prostředí, venkovním prostředí nebo v situacích *in situ*, a to navzdory rostoucímu používání prostorových nástrojů na smartphonech a tabletech ([Nivala a kol., 2008](#); [Peng a kol., 2016](#); [Popelka a kol., 2019a](#)). Překlenutí této mezery bude vyžadovat přijetí ekologičtějších metodik, včetně mobilního sledování pohybu očí a hodnocení použitelnosti v terénu.

5.8.2 VO2: Jaké typy IKV jsou v těchto studiích nejčastěji hodnoceny?

Klíčovým aspektem při hodnocení použitelnosti IKV je **typ geovizualizačního stimulu**, který je uživatelům prezentován během eye-tracking experimentů. Rozbor studií ukázal, že výzkumníci používají celou řadu různých typů interaktivní geovizualizace, od konvenčních **2D digitálních map** až po imerzivní prostředí **virtuální reality**. Významná část výzkumu se však stále soustředí na tradičnější kartografická rozhraní **pro stolní počítače**.

Nejčastěji hodnoceným typem IKV v analyzovaných studiích je **interaktivní 2D digitální mapa**, která představuje přibližně **59 %** všech identifikovaných podnětů. Patří sem široce používané webové mapové platformy, jako jsou *Google Maps* a *Mapbox*, stejně jako na míru navržené 2D rozhraní integrované do prostředí pro testování použitelnosti. Příkladem této kategorie jsou studie [Bradyho a kol. \(2018\)](#), [Cybulského a Horbinského \(2020\)](#), [Mendoncy a Delazariho \(2014\)](#) a [Nivaly a kol. \(2008\)](#). Trvalá prevalence interaktivních 2D map odráží jejich široké použití jak v každodenní navigaci, tak ve specializovaných aplikacích, což z nich činí logický a přístupný předmět výzkumu použitelnosti. Dominance 2D map také souvisí s jejich známostí mezi uživateli, což snižuje rušivé proměnné související s novostí rozhraní a umožňuje výzkumníkům soustředit se více přímo na použitelnost, vizuální pozornost a výkon úkolů. V mnoha z těchto studií byly **hodnoceny interaktivní funkce**, jako je přibližování, posouvání a přepínání vrstev, což poskytuje vhled do účinnosti standardních navigačních ovládacích prvků a vizuálních hierarchií.

Významná část studií se zabývala **interaktivními 3D vizualizacemi**, včetně virtuálních glóbů, 3D modelů terénu a městských prostředí. Ty byly často používány k výzkumu kognitivní zátěže a rozdílů v použitelnosti mezi 2D a 3D kartografickými reprezentacemi. Například [Juřík a kol. \(2016\)](#) a [Bianconi a kol. \(2022\)](#) využili 3D prostředí k prozkoumání prostorového chápání v komplexních scénářích, včetně simulací řízení mimořádných událostí a městské navigace. Interaktivní 3D vizualizace nabízejí další možnosti, jako je otáčení, naklánění a úprava perspektivy, které mohou zvýšit realističnost, ale také přinášejí výzvy v oblasti použitelnosti. Studie sledování pohybu očí zahrnující 3D obsah se často zaměřují na vyhodnocení toho, jak se uživatelé orientují v trojrozměrném prostoru a jak vnímají hloubku a měřítko v kontextu rozhodování.

Několik studií použilo jako primární stimul desktopové **geografické informační systémy (GIS)**, což odráží význam profesionálních nástrojů ve výzkumu IKV. Příkladem jsou studie [Dobešové \(2020\)](#) a [Kudelky a kol. \(2015\)](#), kteří hodnotili použitelnost v akademickém a odborném kontextu. Tyto studie se obvykle zaměřují na návrh map, interpretaci znaků, správu vrstev a složitost úkolů v rámci analytických pracovních postupů. Ačkoli prostředí GIS nabízejí bohatou funkcionalitu, představují také výzvy v oblasti použitelnosti kvůli své složitosti a strmé křivce učení. Studie zaměřené na platformy GIS proto často zahrnují odborné nebo poloodborné účastníky, kteří jsou obeznámeni s manipulací s geoprostorovými daty a rozhodováním na základě map.

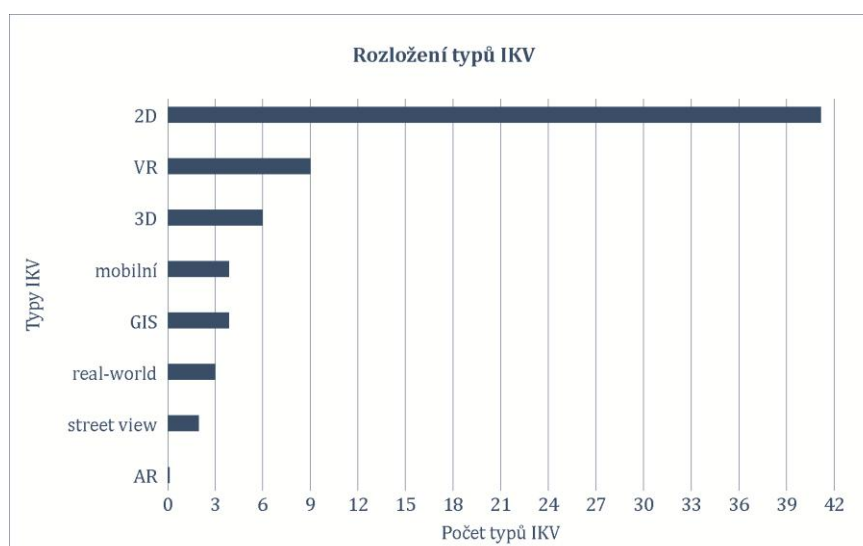
S rostoucím významem prostorových informací na cestách se čtyři studie zabývaly **mobilními mapovými aplikacemi**, například [Bartling a kol. \(2021\)](#) a [Horbinski a kol. \(2020\)](#). Tyto studie často zkoumají interakce v definovaném scénáři, a také řeší omezení velikosti obrazovky a dopady dotykového ovládání na uživatelský zážitek a použitelnost. Sledování pohybu očí v mobilním kontextu může využívat buď vestavěné kamerové řešení v mobilním telefonu, nebo eye-trackery připevněné na hlavu, které umožňují pozorování chování uživatelů během

navigace nebo prozkoumávání na konkrétním místě. Mobilní IKV ale představují jedinečné výzvy, které se liší od aplikací pro stolní počítače, včetně zmenšeného zorného pole, větší variability světelných podmínek a dynamického pohybu uživatelů. Nicméně ve srovnání s 2D mapami pro stolní počítače zůstávají nedostatečně zastoupeny.

Novým směrem ve výzkumu použitelnosti IKV je využití v prostředí **virtuální reality** (VR), zejména u těch, která využívají *head-mounted* displeje, jako jsou *Oculus Rift* a *HTC Vive*. Studie, jako jsou například studie [Santose-Torrese a kol. \(2018\)](#) a [Torrense a Kima \(2024\)](#) začlenily imerzivní VR do simulace městské mobility, prostorového rozhodování a testování v reálných scénářích. Prostředí VR umožňují vysokou míru interaktivity a realismu, což výzkumníkům umožňuje zachytit ztělesněné prostorové chování a posoudit dopad imerze na prostorové vnímání. Technické požadavky a složitost nastavení experimentů VR však pravděpodobně přispívají k jejich relativně omezenému využívání ve srovnání s konvenčnějšími typy vizualizace.

Je třeba poznamenat, že ačkoli žádná ze studií zahrnutých do tohoto přehledu nevyužívala **rozšířenou realitu** (AR) jako médium pro IKV, tento typ byl přesto zahrnut do této klasifikace. Toto rozhodnutí bylo podloženo několika přehledovými články a metodologickými diskusemi v analyzované literatuře (např. [Fairbairn a Hepburn \(2023\)](#)), které zdůraznily AR jako slibný směr pro budoucí výzkum. Zahrnutí AR do tohoto přehledu tedy slouží dvěma účelům: zaprvé uznat její rostoucí význam v širším výzkumném diskurzu a zadruhé zdůraznit její současnou absenci v empirickém testování použitelnosti pomocí sledování pohybu očí.

Tyto trendy shrnuje **Obrázek 28**, který ilustruje rozložení typů IKV použitých v hodnocených studiích. Drtivá většina se zaměřila na interaktivní **2D** digitální mapy ($n = 41$), následované imerzivními **VR** prostředím ($n = 9$) a interaktivními **3D** vizualizacemi ($n = 6$). **Mobilní IKV** a aplikace **GIS** byly hodnoceny ve čtyřech studiích, zatímco experimenty v reálném světě ($n = 3$), rozhraní *street view* ($n = 2$) a vizualizace AR ($n = 0$) byly méně časté nebo zcela chyběly.



Obrázek 28: Rozložení typů IKV v analyzovaných eye-tracking studiích.

5.8.3 VO3: Jaké techniky související s metodou eye-tracking jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?

V analyzovaném souboru studií převažovaly přístupy založené na analýze **fixací**, zejména z hlediska jejich **počtu**, **délky** trvání a **pořadí**. Sekvence fixací (*scanpaths*) se často analyzují, aby se odhalily strategie vyhledávání uživatelů. V některých případech jsou delší fixace interpretovány jako indikátory zvýšené kognitivní zátěže nebo obtížnosti zpracování informací (De Cock a kol., 2022).

Často uváděnou metrikou je **čas do první fixace** (TTFF), který měří, jak rychle si uživatel všimne klíčového prvku. Další běžnou technikou je používání **oblastí zájmu** (AOI), které zachycují počet a rozložení fixací v předem definovaných oblastech rozhraní.

Široce se také používají **metriky sakád** jako je počet, amplituda a směr sakád, které poskytují informace o přesunech pozornosti. Například delší sakády často odrážejí nižší kognitivní zátěž (plynulé pohyby), zatímco kratší sakády mohou naznačovat vizuální vyhledávací úsilí (De Cock a kol., 2022).

Pokud jde o **vizualizaci eye-tracking dat**, nejčastěji používanými technikami byly **heatmapy** a **distribuce pohledů**. Menší počet studií využíval pokročilé nástroje, jako jsou podpůrné vektorové stroje (SVM) pro automatickou klasifikaci aktivit uživatelů (Kiefer a kol., 2013) a 3D analýza pohledů pomocí dat bodového mraku (Herman, 2019b; Herman a kol., 2017).

Sledování pohybu očí bylo často integrováno s jinými analytickými metodami, zejména:

- ↳ **zaznamenávání interakcí**, které slouží k zachycení změn rozhraní vyvolaných uživatelem,
- ↳ **sledování pohybu myši** (mouse-tracking), které sleduje pohyby ukazatele a kliknutí,
- ↳ a **kvantitativní/statistická analýza** pro interpretaci výsledků.

Pokud jde o **metriky hodnocení použitelnosti**, nejčastěji byla hodnocena **efektivnost** (např. čas potřebný k dokončení úkolu), následovaná **účinností** (např. míra úspěšnosti) a **spokojeností**. Spokojenost však byla často uváděna pouze verbálně nebo formou anekdot, a pouze menšina studií používala standardizované nástroje, jako jsou **SUS** (*System Usability Scale*), **NASA-TLX** (*Task Load Index*), **UEQ** (*User Experience Questionnaire*) a **MSQ** (*Minnesota Satisfaction Questionnaire*). Ačkoli jsou tyto standardizované nástroje málo využívány, doporučují se pro zlepšení srovnatelnosti a hloubky hodnocení použitelnosti (Díaz-Oreiro a kol., 2019).

Přehled použitých metod a nástrojů uvádí **Tabulka 3**, která výsledky rozděluje do čtyř hlavních kategorií: (1) Metody a metriky sledování pohybu očí (např. fixace, sakády, AOI); (2) Aplikované analytické metody kombinované se sledováním pohybu očí (např. zaznamenávání interakcí, EEG); (3) Techniky vizualizace dat o pohledu (např. heatmapy, FDP); (4) Pokročilé nástroje a inovace (např. 3DGazeR, strojové učení).

Tabulka 3: Počet metod a metrik sledování pohybu očí použitých v analyzovaných studiích

Použité eye-tracking metody a metriky	
Fixace (<i>fixations</i>) – počet a délka fixací	51
Sekvence fixací (<i>scanpath</i>)	37
AOI (Areas of Interest) – oblasti zájmu	29
Sakády (<i>saccades</i>)	19
TTF (Time To First Fixation) – čas do první fixace	13
Amplituda sakád (<i>saccade amplitudes</i>) nebo délka skenování (<i>scanpath length</i>)	6
Expertní interpretace dat	5
Dilatace zornic (<i>pupil dilations</i>) – kognitivní zátěž	4
Doba setrvání pohledu (<i>dwell times</i>)	3
Geometrie trajektorie (<i>trajectory geometries</i>)	3
Počet mrknutí (<i>blink rates</i>)	2
Rychlost pohybu očí (<i>eye movement speed</i>)	1
Použité eye-tracking vizualizace	
Heatmapy (<i>heatmaps</i>)	35
Distribuce pohledů (<i>gaze distribution</i>)	13
Nástroje pro vizuální analýzu (<i>Visual Analytics Tools</i>)	2
FlowMap vizualizace	1
FDP (<i>Fixation Distance Plot</i>) – graf fixační vzdálenosti	1
Grafy interakcí (<i>interaction graphs</i>)	1
3D analýza pohledu (<i>3D gaze analysis</i> , např. <i>PointCloud data</i>)	1
Použité analytické metody v kombinaci s metodou eye-tracking	
Efektivnost (<i>efficiency</i>) – např. čas potřebný k dokončení úkolu	34
Účinnost (<i>effectiveness</i>) – např. úspěšnost	24
Spokojenost (<i>satisfaction</i>)	23
Kvantitativní nebo statistické vyhodnocení	23
Zaznamenávání interakcí uživatelů (<i>logging</i>)	21
Sledování pohybu myši (<i>mouse-tracking</i>)	10
Doplňkové dotazníky	10
Think-aloud nebo talk-aloud protokoly	7
EEG – elektroencefalografie	4
Doplňkové rozhovory	4
Dotazníky SUS (<i>System Usability Scale</i>)	4
Dotazníky NASA TLX (<i>NASA Task Load Index</i>)	4
Dotazníky UEQ (<i>User Experience Questionnaire</i>)	3
Primární rozhovory	2
Dotazník MSQ (<i>Minnesota Satisfaction Questionnaire</i>)	1

GSR (<i>Galvanic Skin Response</i>) – galvanická reakce kůže na emoce	1
MoCap (<i>Motion Capture</i>) – snímání pohybu pro motorickou aktivitu	1
fNIRS – monitorování neurokognitivních reakcí	1
TTFC (<i>Time To First Click</i>) – čas do prvního kliknutí	1
Heuristické hodnocení	1
Použité pokročilé eye-tracking nástroje a jiné typy studií	
Inovativní přístupy nebo testování nových principů s eye-tracking využitím	11
Inovativní přístupy nebo testování nových principů bez eye-tracking využití	5
3DgazeR	1
FeaturEyeTrack	1
SVM (<i>Support Vector Machine</i>) učení	1
Hypothesis platforma	1

5.8.4 VO4: Jaké typy úkolů jsou nejčastěji používány při hodnocení použitelnosti IKV?

Analýza studií odhalila různé **typy úkolů** používaných k hodnocení různých aspektů interakce uživatelů, kognitivní zátěže a prostorového chápání. V literatuře byly úkoly obecně rozděleny do kategorií navigačních, vyhledávacích, explorativních, analytických, srovnávacích, plánovacích, paměťových a orientačních úkolů. Tato klasifikace je v souladu s předchozími přehledovými studiemi (např. Fairbairn a Hepburn (2023); Keskin a Kettunen (2023); Kiefer a kol. (2017); Krassanakis a Cybulski (2019)). Tento přehled tak poskytuje strukturované pochopení funkčních a kognitivních dimenzí hodnocených v IKV. Celkový počet úkolů použitých ve studiích je uveden v **Tabulka 4**.

Tabulka 4: Počet typů úkolů používaných v analyzovaných studiích

Typy úkolů	Počet studií	Počet výskytů ve studiích
Navigační úkoly	24	52
Vyhledávací úkoly	47	107
Explorativní nebo otevřené úkoly	24	32
Analytické úkoly	36	94
Srovnávací úkoly	11	19
Plánovací úkoly	9	10
Paměťové a orientační úkoly	13	21
Úkoly založené na scénářích	12	18

Navigační úkoly (*navigational tasks*) obvykle vyžadují, aby uživatelé prováděli základní operace s mapou, jako je přibližování, posouvání a plánování trasy. Slouží jako praktický prostředek k pozorování toho, jak uživatelé pracují s mapovým rozhraním při provádění základních prostorových činností. Uživatelé mohou být například požádáni, aby našli optimální trasu mezi dvěma body (Nivala a kol., 2008), po přiblížení nebo oddálení znovu našli dříve

pozorovaný objekt (Manson a kol., 2012) nebo se rozhodli, kterým směrem se vydat na složitých křižovatkách (Liao a kol., 2017). Tyto úkoly testují účinnost navigačních ovládacích prvků a často se překrývají s jinými kognitivními procesy, jako jsou prostorové uvažování a plánování trasy.

Vyhledávací úkoly (*search-based tasks* nebo *focused search*) představují základní součást testování použitelnosti v IKV. Tyto úkoly zahrnují identifikaci nebo lokalizaci konkrétních geografických entit, jako jsou města, body zájmu (POI) nebo jedinečné prvky na mapě. Klasickým příkladem je vyhledání a identifikace názvů míst na mapě (Ooms a kol., 2010), určení nejsevernější ulice obsahující konkrétní řetězec znaků (Nivala a kol., 2008) nebo nalezení konkrétních objektů v panoramatické scéně (Kwok a kol., 2019). Prevalence úkolů založených na vyhledávání zdůrazňuje jejich užitečnost při hodnocení toho, jak efektivně uživatelé dokážou interpretovat vizuální hierarchie, rozpoznávat znaky a zpracovávat popisky na mapách.

Explorativní nebo otevřené úkoly (*exploratory* nebo *open-ended tasks*) umožňují uživatelům volně interagovat s IKV bez předem definovaných cílů nebo omezení. Tyto úkoly jsou důležité pro zachycení přirozeného chování uživatelů a strategií prostorového zkoumání. Poskytují vhled do toho, jak uživatelé pracují s obsahem, když mají svobodu prozkoumávat, a často se používají k pozorování spontánních pohybů očí, skenovacích cest a rozložení pozornosti. Studie využívající takové úkoly zahrnují volné zkoumání panoramatických map (Kiefer a kol., 2013), interakci s 3D modely (Hsiao a kol., 2021) a navigaci ve webových prostorových rozhraních (Choi a kol., 2024). Explorativní úkoly odrážejí posun směrem k pochopení zapojení uživatelů v reálných scénářích, kde mohou být cíle dynamické nebo definované uživatelem.

Analytické úkoly (*analytical tasks*) kladou vyšší nároky na kognitivní schopnosti uživatelů, kteří musí interpretovat prostorové vzorce, identifikovat vztahy mezi proměnnými nebo odhalit anomálie v datech. Tyto úkoly jsou klíčové pro pochopení toho, jak uživatelé zpracovávají komplexní prostorové informace a jak interpretují vícerozměrné datové soubory. Participantů mohou být například požádáni, aby identifikovali klíčové proměnné a odhalili nesrovnalosti (Golebiowska a kol., 2017), analyzovali korelace mezi mírou kriminality a socioekonomickými ukazateli (Roth a kol., 2015b) nebo vyhodnotili vizuální strategie pro reprezentaci dat (Popelka a kol., 2019a). Analytické úkoly jsou často navrženy tak, aby hodnotily nejen vizuální srozumitelnost mapy, ale také kognitivní strategie, které uživatelé používají při řešení problémů.

Srovnávací úkoly (*comparative tasks*) se zaměřují na hodnocení preferencí uživatelů, porozumění a efektivity různých verzí nebo typů IKV. Obvykle zahrnují srovnání mezi 2D a 3D reprezentacemi (Krassanakis a Cybulski, 2019), časovými snímky (např. mapami z různých let) (Mendonça a Delazari, 2014) nebo jinými vizuálními styly webových map (Popelka a kol., 2019b). Tyto úkoly často slouží dvojímu účelu, a to testování účinnosti alternativních návrhů a zjišťování subjektivních preferencí uživatelů. Vzhledem ke své interpretační povaze se srovnávací úkoly často překrývají s analytickými úkoly, zejména když uživatelé musí odůvodnit svá rozhodnutí nebo seřadit alternativy na základě vizuální srozumitelnosti a bohatosti informací.

Plánovací úkoly (*planning tasks*) přesahují rámec základní navigace tím, že zavádějí podmínky, které vyžadují strategické rozhodování. Uživatelé jsou obvykle žádáni, aby

plánovali trasy, vybírali cíle nebo činili rozhodnutí na základě polohy, přičemž zohledňují více kritérií, jako jsou vzdálenost, náklady, bezpečnost nebo preference uživatelů. Příklady zahrnují návrh nejúčinnější trasy mezi městy (Nivala a kol., 2008), výběr nejkratší trasy na univerzitním kampusu (Mendonça a Delazari, 2012) nebo výběr optimálního hotelu na základě nákladů a blízkosti (Qvarfordt a kol., 2005). Plánovací úkoly velmi věrně napodobují reálné rozhodovací kontexty a jsou cenné při hodnocení toho, jak uživatelé při interakci s IKV vyvažují více omezení.

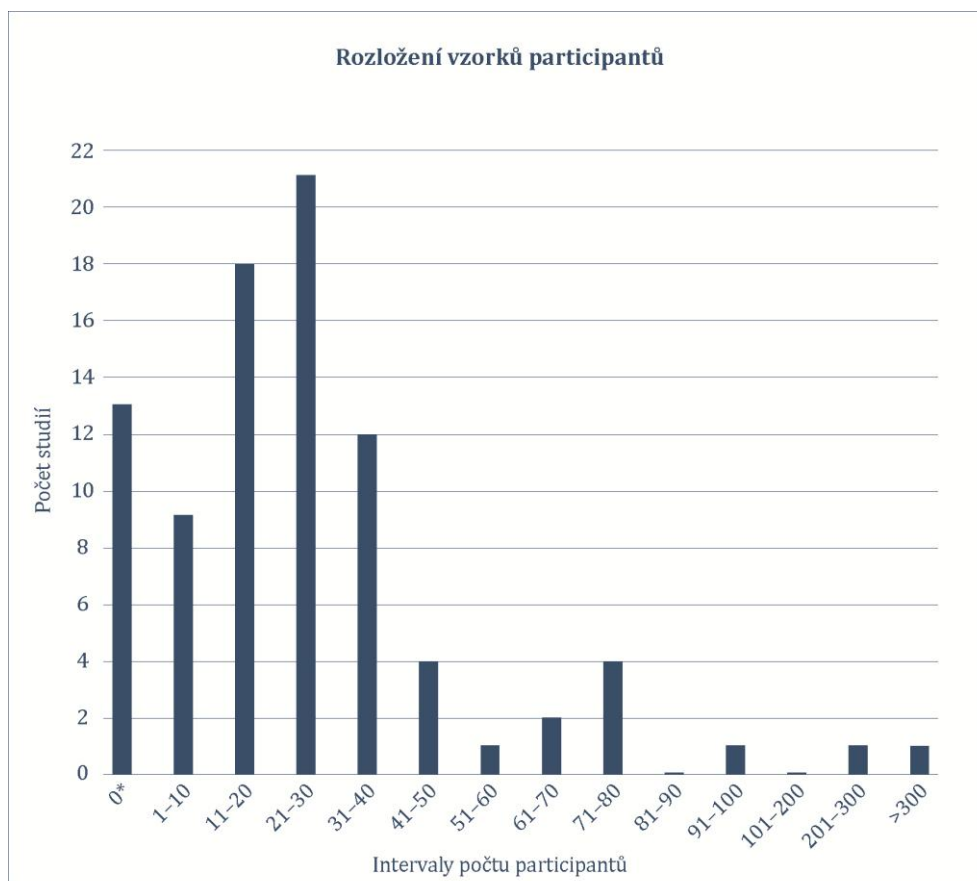
Paměťové (*memory-based*) a **orientační** (*orientation*) **úkoly** – Některé studie zahrnovaly úkoly, které testovaly prostorovou paměť a orientační schopnosti uživatelů. Tyto úkoly zahrnovaly vybavení si dříve viděných prvků mapy, rekonstrukci mentálních představ o prostorovém uspořádání nebo navigaci na základě zapamatovaných orientačních bodů. Uživatelé mohou být například požádáni, aby si zapamatovali uspořádání budov a následně určili jejich směr (Napieralski a kol., 2014) nebo identifikovali popisky, které byly dříve viditelné, ale od té doby byly zakryty posunem mapy (Ooms a kol., 2012b). Tyto úkoly pomáhají výzkumníkům posoudit, jak efektivně uživatelé kódují a vyhledávají prostorové informace, což je kritický faktor při hodnocení dlouhodobé použitelnosti a retence uživatelů v kartografických aplikacích.

Úkoly založené na scénářích (*scenario-based tasks*) – Menší část studií využívala úkoly založené na scénářích, které simulují složité, víceúrovňové pracovní postupy uživatelů, kombinující jednodušší typy úkolů. Tyto úkoly jsou zvláště relevantní v oblasti reakce na mimořádné události nebo urbanistického plánování, kde uživatelé musí navigovat, analyzovat data a činit rozhodnutí s vysokou mírou rizika pod časovým tlakem. Například Bianconi a kol. (2022) předložili účastníkům scénáře krizového řízení vyžadující navigaci, interpretaci dat a rozhodovací kroky. Úkoly založené na scénářích poskytují komplexní hodnocení použitelnosti tím, že simulují složitost a interaktivitu reálných prostředí.

5.8.5 VO5: Kolik participantů je obvykle rekrutováno do eye-tracking studií pro IKV a jaké jsou jejich charakteristiky?

Zásadním aspektem při posuzování metodické robustnosti a obecné platnosti studií sledování pohybu očí je pochopení **složení a velikosti vzorků participantů**. V rámci tohoto přehledu byl zkoumán také počet participantů zapojených do experimentů hodnotících použitelnost IKV, spolu s jejich uváděnými demografickými charakteristikami, strategiemi výběru participantů a přítomností případných pobídek k účasti.

V rámci zkoumaných studií se počet participantů značně **lišil (Obrázek 29)**. Nejčastěji se experimenty týkaly vzorků o velikosti **11 až 40 participantů**, což je standardní rozsah pro laboratorní testování použitelnosti v kartografickém kontextu. Například Brady a kol. (2018) provedli experiment s 16 participanty, Popelka a kol. (2022) rekrutovali 25 participantů a Çöltekin a kol. (2009) zahrnuli vzorek 30 osob. Tato čísla odrážejí rovnováhu mezi praktickými omezeními kontrolovaných studií a potřebou dostatečné statistické síly.



Obrázek 29: Rozložení velikosti vzorků participantů v analyzovaných studiích.

* číslo 0 znamená, že počet účastníků nebyl uveden nebo nebyl relevantní

Ve studiích zahrnujících srovnávací testování více verzí map nebo interakčních technik byli participanté často **rozděleni do skupin** srovnatelné velikosti, aby se usnadnila analýza mezi subjekty. Například [Giannopoulos a kol. \(2015\)](#) rozdělili 32 účastníků mezi dvě různé metody vizualizace a zajistili, aby každá podmínka měla stejný počet pozorování.

Ačkoli v této oblasti převládají studie menšího rozsahu, menšina z nich použila výrazně větší vzorky participantů. [Horbinski a kol. \(2020\)](#) uvádějí vzorek **100 participantů**, zatímco [Mendonça a Delazari \(2012\)](#) vynikají počtem **302 participantů** (největší vzorek nalezený v tomto přehledu). Takové rozsáhlé studie jsou vzácné a často se provádějí v prostředí, kde je sběr dat začleněn do širších uživatelských testů nebo aplikací určených pro veřejnost.

Podstatná část zkoumaných studií se opírala o **účast studentů vysokých škol**, zejména z oborů jako geoinformatika, geografie, kartografie nebo informační technologie. Tento trend je v souladu s výzkumem použitelnosti v jiných oblastech, kde jsou studenti snadno dostupní, relativně homogenní z hlediska věku a vzdělání a obvykle obeznámení s digitálními rozhraními. Například [Dobešová \(2020\)](#) získala 22 studentů geoinformatiky pro experiment s měřením pohybu očí, který hodnotil použitelnost map.

Ačkoli studenti představují vhodný vzorek, několik studií se rozhodlo pro **cílenější skupiny** participantů, jako jsou odborníci v dané oblasti nebo profesionální uživatelé. Například [Buddeberg a kol. \(2017\)](#) zapojili 49 kartografických odborníků, což umožnilo hlubší pochopení

používání map na odborné úrovni a prostorového vnímání. Tyto studie tedy potvrzují význam sladění výběru participantů s cíli studie, zejména při hodnocení specializovaných aplikací nebo expertních systémů.

Demografické charakteristiky, jako jsou věk, pohlaví a vzdělání, nebyly uváděny konzistentně. Tam, kde byly údaje k dispozici, byla většina účastníků identifikována jako mladí dospělí, obvykle ve věku kolem dvaceti let. Zastoupení pohlaví se však lišilo. Některé studie dosáhly genderové rovnováhy, jiné vykazovaly převahu jednoho pohlaví. Například ve studiích [Buddeberg a kol. \(2017\)](#) a [Almahmoud a kol. \(2017\)](#) převládali muži, zatímco ve studiích [Liao a kol. \(2017\)](#) a [Blascheck a kol. \(2016b\)](#) tvořily většinu ženy. Rozložení pohlaví často odráželo dostupnou skupinu účastníků spíše než záměrnou strategii výběru vzorku.

Nedostatek konzistentních demografických údajů představuje **výzvu pro zobecnění**, zejména při posuzování použitelnosti zjištění u různých skupin uživatelů, věkových kohort nebo kulturních kontextů. Vzhledem k vlivu individuálních rozdílů v prostorových schopnostech a preferencích interakce by budoucí studie měly těžit z přísnějšího a transparentnějšího vykazování demografických informací.

Finanční nebo materiální odměny za účast byly ve zkoumaných studiích relativně vzácné. Tam, kde byly pobídky nabízeny, byly obvykle skromné – participant například obdrželi 10 dolarů ([Alam a Jianu, 2017](#)), 10 eur ([Blascheck a kol., 2016b](#)) nebo malé poukázky a dárky ([Brock a kol., 2015](#)). V některých případech (např. [May a kol. \(2014\)](#)) participant obdrželi nominální odměnu v rozmezí od 5 do 10 liber. Většina studií však odměnu nenabízela a spoléhala se místo toho na dobrovolnou účast, zejména v rámci studentských kohort.

Zatímco odměny nemusí být nezbytné pro studie zahrnující snadno dostupné populace, jako jsou studenti, stávají se stále důležitější při zapojování profesionálních nebo neakademických participantů s omezenou dostupností.

5.8.6 VO6: Jaké praktické aplikace mají výsledky eye-tracking studií v reálných scénářích?

Ačkoli eye-tracking studie při IKV jsou často přizpůsobeny konkrétním vizuálním stimulům nebo uživatelským rozhraním, jejich závěry mají **významné dopady** přesahující rámec jednotlivých experimentů. Navzdory rozmanitosti metod, návrhů a kontextů nabízí mnoho studií praktické poznatky, které slouží jako podklad pro vývoj, optimalizaci a personalizaci nástrojů a systémů prostorových informací v reálných scénářích. Tato část nastiňuje nejvýznamnější oblasti, ve kterých výzkum sledování pohybu očí vedl k praktickým pokrokům.

Jedním z nejkonzistentnějších přínosů výzkumu sledování pohybu očí je **zlepšení designu uživatelského rozhraní (UI) a uživatelské zkušenosti (UX)**. Data o pohybu očí poskytují přímý vhled do pozornosti uživatele, kognitivní zátěže a vizuálního zapojení, což je činí obzvláště cennými pro identifikaci problémů s použitelností v komplexních rozhraních IKV. Několik studií využilo eye-tracking data k vylepšení struktury rozvržení, zvýšení čitelnosti mapy nebo přemístění interaktivních prvků na základě toho, jak uživatelé vizuálně procházeli obsahem (např. [Roth a kol. \(2015b\)](#); [Popelka a kol. \(2019b\)](#)). Taková vylepšení jsou zejména významná pro takové IKV, které vyžadují, aby uživatelé prováděli podrobné analytické nebo vyhledávací úkoly, kde neefektivní design může bránit efektivitě úkolů nebo vést k nesprávné interpretaci. Sledování pohybu očí tak umožňuje designérům vytvářet intuitivnější a efektivnější rozhraní tím, že zvýrazňuje oblasti vizuálního zmatku nebo zanedbání.

Dalším pozoruhodným praktickým uplatněním je **vývoj adaptivních rozhraní**, která v reálném čase reagují na vzorce pohledu uživatele (tzv. *gaze-based interactions*). Tyto systémy využívají data ze sledování pohybu očí k dynamickému přizpůsobení rozhraní podle pozornosti nebo stylu interakce uživatele. Například [Alam a Jianu \(2017\)](#) a [Almahmoud a kol. \(2017\)](#) zkoumali použití zpětnovazebních smyček založených na pohledu k vyvolání vizuálních podnětů nebo úpravě obsahu v závislosti na tom, kam se uživatelé dívají, jak dlouho se dívají nebo zda vykazují známky dezorientace. Taková rozhraní jsou slibná v kontextech, kde lze kognitivní přetížení nebo složitost informací zmírnit přizpůsobením rozhraní – například v panelech pro reakci na mimořádné události, rozhodovacích nástrojích založených na GIS nebo platformách pro územní plánování.

Několik studií prokázalo, jak mohou eye-tracking data podpořit **personalizované poskytování obsahu**, zejména v aplikacích, jako je cestovní ruch nebo služby založené na lokalizaci. Například [Anagnostopoulos a kol. \(2017\)](#) zkoumali eye-tracking pro přizpůsobení bodů zájmu (POI) a navigačních návrhů v aplikacích pro cestovní ruch na základě toho, co upoutá pozornost uživatele. Identifikací prvků, které trvale zaujmou různé skupiny uživatelů, lze navrhnout systémy, které upřednostňují obsah nejrelevantnější pro individuální preference nebo chování. Tento přístup se rozšiřuje na personalizované poznámky k mapám, návrhy tras nebo kontextová doporučení, což přispívá k více uživatelsky orientovaným prostorovým aplikacím, které zvyšují spokojenost a zapojení uživatelů.

Studie sledování pohybu očí byly také použity v **krizovém řízení**, kde je rozhodující rychlé rozhodování a prostorové vnímání. Například [Brady a kol. \(2018\)](#) použili data o pohybu očí k vyhodnocení toho, jak záchranáři reagují na dynamické vizualizace během úkolů založených na scénářích. Zjištění přispěla k optimalizaci rozložení rozhraní a prioritizaci informací v nouzových panelech, čímž bylo zajištěno, že kritická prostorová data jsou prezentována jasným a přístupným způsobem. V prostředí s vysokými riziky mohou i malé zlepšení použitelnosti mapových systémů podstatně ovlivnit rychlost a přesnost rozhodování, což činí eye-tracking cenným nástrojem pro zdokonalování těchto systémů v simulovaných nebo reálných podmínkách.

Rostoucí oblastí použití je **eye-tracking v urbanismu** a při navrhování veřejných prostor. [Bianconi a kol. \(2022\)](#) použili virtuální 3D modely a sledování pohybu očí k analýze toho, jak uživatelé vnímají urbanistické uspořádání, veřejné značení a prostorové stimuly. Tyto poznatky pomáhají urbanistům a architektům pochopit, které prvky přitahují pozornost a které jsou přehlíženy, což vede k přístupnějším, srozumitelnějším a na člověka zaměřeným veřejným prostorům. Takové studie jsou obzvláště relevantní v kontextu participativního plánování, kde se plánovači snaží začlenit zkušenosti uživatelů do návrhu dopravních systémů, pěších zón nebo informačního značení v městském prostředí.

Obzvláště významným uplatněním eye-tracking výzkumu je jeho role při **podpoře inkluze a přístupnosti**. Několik studií zkoumalo, jak lze kartografické vizualizace přizpůsobit uživatelům se zrakovým postižením nebo omezenou pohyblivostí. Například [Brock a kol. \(2015\)](#) využili eye-tracking k podpoře vývoje interaktivních map pro nevidomé uživatele. [Putra a Ogata \(2022\)](#) se zaměřili na návrh navigačních systémů pro osoby s omezenými fyzickými schopnostmi. Identifikováním toho, jak různé skupiny uživatelů interagují s prostorovými informacemi, mohou výzkumníci a vývojáři vytvářet inkluzivnější IKV, které

vyhovují širšímu spektru potřeb a preferencí. Eye-tracking je tedy výkonným diagnostickým a návrhovým nástrojem při snaze o univerzální přístupnost v prostorových aplikacích.

Eye-tracking výzkum rovněž přispívá k **plánování** životního prostředí a veřejné správy tím, že zlepšuje srozumitelnost a účinnost IKV používaných při participativním rozhodování. Studie [Fairbairna a Hepburna \(2023\)](#) a [Rotha a kol. \(2015b\)](#) naznačují, že vzorce pozornosti uživatelů mohou být podkladem pro návrh map a dashboardů pro zapojení veřejnosti, projednávání politik nebo environmentální vzdělávání. Tyto poznatky mohou zlepšit způsob prezentace prostorových dat laické veřejnosti a zvýšit transparentnost a srozumitelnost plánovacích procesů.

Ačkoli je každá eye-tracking studie vázána na konkrétní stimul nebo kontext, výsledky mají **široké praktické dopady**. Od zdokonalování vizuálních rozhraní a vytváření systémů reagujících na pohled až po podporu inkluzivního designu a veřejného rozhodování přináší eye-tracking cenné poznatky, které přesahují rámec akademického výzkumu. Reálné aplikace identifikované v tomto přehledu pokrývají různé oblasti, včetně cestovního ruchu, urbanismu, reakce na mimořádné události, správy životního prostředí a přístupnosti. S vývojem technologií se očekává, že role metody eye-tracking při vývoji inteligentních, adaptivních a uživatelsky orientovaných geovizualizačních nástrojů bude dále expandovat.

5.8.7 V07: Jak se v průběhu času vyvíjely výzkumné eye-tracking přístupy při hodnocení použitelnosti IKV?

V uplynulých dvou desetiletích prošla oblast eye-tracking výzkumu zaměřeného na použitelnost IKV podstatnou transformací. Od první identifikované studie z roku 2005 rozšířily technologické a metodologické pokroky škálu stimulů, prostředí a výzkumných otázek, kterými se lze zabývat. Tato část nastiňuje klíčové trendy a změny pozorované v přístupech k eye-tracking výzkumu od roku 2005 (nejstarší nalezená studie) do roku 2025, se zaměřením na vývoj hardwaru pro sledování pohybu očí, testovací prostředí a povahu vizuálních stimulů.

V této souvislosti byly **počátky eye-tracking výzkumu** charakterizovány relativně jednoduchými sestavami zahrnujícími stolní zařízení pro sledování pohybu očí a interaktivní 2D mapy zobrazené na monitorech. Zařízení jako *EyeLink 1000* nebo *Tobii X120* představovala v tomto období standardní technologickou infrastrukturu. V některých případech výzkumníci používali systémy vyrobené na zakázku nebo systémy pro výzkumné účely, jako například *duální sledovač Purkinjeho obrazu* vyvinutý v *SRI International*, který použili [Qvarfordt a kol. \(2005\)](#). Tyto systémy poskytly základní poznatky o vizuální pozornosti a interakci uživatelů se statickými nebo polodynamickými rozhraními 2D map. Významné rané studie, včetně studií [Qvarfordta a kol. \(2005\)](#) a [Ooms a kol. \(2010\)](#), zkoumaly vizuální chování během základních navigačních nebo vyhledávacích úkolů na mapě. Omezená vzorkovací frekvence a přesnost raných zařízení kladla omezení na rozlišení a přesnost dat. Tyto studie však položily základy pro zavedení sledování pohybu očí jako životaschopné metody v kartografickém výzkumu použitelnosti.

V letech 2010 až 2014 došlo v této oblasti k postupnému, ale významnému pokroku v oblasti hardwarového výkonu. Eye-trackery, jako například *EyeLink 1000* (používaný již v letech 2010 a 2011), byly i nadále široce využívány pro vysokofrekvenční vzorkování. Širší rozšíření pokročilejších stolních zařízení, jako je *SMI RED250*, se však objevilo až v roce 2014. Tyto nástroje, schopné vzorkování při 250 Hz, umožnily podrobnější analýzy fixací, sakád

a skenovacích drah. Toto období znamenalo začátek podrobnějších studií vizuální pozornosti, zejména v komplexních nebo informačně bohatých IKV. Například [Ooms a kol. \(2012a\)](#) a [Kudelka a kol. \(2015\)](#) použili zařízení s vyšší frekvencí (*EyeLink 1000* anebo *SMI RED 250*) k zachycení jemných rozdílů v tom, jak uživatelé interagovali s mapami.

Od roku 2015 došlo k významné metodologické změně s širším přijetím **mobilních zařízení** pro sledování pohybu očí, jako jsou brýle *Tobii Glasses* a *SMI Eye Tracking Glasses*. Tyto mobilní systémy umožnily výzkumníkům překročit omezení laboratoří a provádět experimenty v reálném prostředí, včetně venkovních prostor nebo simulovaných scénářů na úrovni ulice. Studie, jako například studie [Kwoka a kol. \(2019\)](#), prokázaly potenciál testování použitelnosti *in situ* a poskytly nové poznatky o tom, jak se uživatelé chovají v dynamických kontextech s prostorovým pohybem, proměnlivým osvětlením a navigací v reálném čase. Přijetí mobilních eye-tracking zařízení také otevřelo dveře k hodnocení použitelnosti mobilních mapových aplikací, které byly dosud nedostatečně zastoupeny kvůli logistickým problémům se sledováním pohledu na přenosných zařízeních.

Od roku 2019 je významným trendem integrace funkcí sledování pohybu očí do **headsetů pro virtuální realitu (VR)**, jako je *HTC Vive Pro Eye* (vzorkování při 120 Hz) a dalších imerzivních systémů. Tento vývoj podnítil novou vlnu studií zaměřených na virtuální prostředí, 3D mapy a imerzivní městské modely. Výzkum založený na VR, jehož příkladem jsou studie [Bianconiho a kol. \(2022\)](#), [Spura a kol. \(2020\)](#), a [Torrense a Kima \(2024\)](#), umožňuje hlubší zkoumání prostorového vnímání, vzorců pozornosti a imerze uživatelů. Tyto studie využily možnosti VR k simulaci realistických úkolů v kontrolovaných virtuálních prostředích, jako jsou scénáře krizového řízení nebo městská navigace ve 3D. Sledování pohybu očí ve VR také umožňuje výzkumníkům zkoumat koordinaci hlavy a očí, vnímání hloubky a interakce v 360stupňovém zorném poli – dimenze, které je obtížné studovat pomocí tradičních 2D displejů. Rostoucí využívání VR platforem tak znamená významné rozšíření metodických a analytických schopností výzkumníků.

S vývojem hardwaru souběžně dochází k **diverzifikaci typů používaných stimulů**. Interaktivní 2D mapy zůstávají nejčastěji testovaným typem IKV (41 studií), ale výrazně vzrostl počet vizualizací založených na virtuální realitě (devět studií od roku 2019). Naproti tomu aplikace GIS, mobilní mapy a panoramatické snímky ve stylu *street view* zůstávají relativně málo zastoupeny a objevují se v méně než pěti studiích. Tento posun ilustruje širší trend, tedy od experimentů zaměřených na úkoly prováděných na stolních počítačích k imerzivnějším, dynamičtějším a kontextově citlivějším hodnocení. Každopádně dnešní studie běžně kombinují více technologií – stacionární eye-trackery pro analýzu ve vysokém rozlišení, mobilní eye-trackery pro terénní studie a VR headsety pro imerzivní zážitky.

Přehled eye-tracking zařízení použitých v analyzovaných studiích vizualizuje **Obrázek 30**.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Stacionární eye-trackery (Tobii)																					
Tobii X50								1													
Tobii X60															1						
Tobii T60 XL											1	3	1								
Tobii T120														2							
Tobii X120				1		1			1				1								
Tobii TX300													1		2						
Tobii X2-60																1				1	
Tobii EyeX*													1								
Tobii Eye Tracker 4C																		1			
Tobii Eye Tracker 5																			1		1
Stacionární eye-trackery (SMI)																					
SMI RED250											2	1	1		2	1		1			
SMI RED500																1					
SMI RED-n Remote Eye Tracker													1								
Mobilní eye-trackery																					
SMI Eye-Tracking Glasses 2.0								1					1		1						
SMI Eye-Tracking Glasses v1.84													1								
SMI ETG 2.1 Mobile Eye-Tracking Glasses																1					
Tobii Pro Glasses 2																			1	1	
VR eye-trackery																					
HTC Vive Pro Eye with integrated ET																2	1	1	1	1	
Ostatní eye-trackery																					
EyeLink 1000						1		2										1			
Eye Tribe Tracker												1	1								
Gazepoint GP3 / GP3 HD / GP3 Eye Tracker														1			1				
Ergoneers DIKABLIS Eye Tracking System											1						1				
Custom-developed eye-trackers	1																	1			

Obrázek 30: Přehled eye-trackerů použitých v analyzovaných studiích.

Zahrnuty jsou pouze studie, které výslovně uvádějí název eye-tracking zařízení.

Podle Fairbairna a Hepburna (2023) se v této oblasti nyní zkoumá **potenciál rozšířené reality (AR)** jako média pro geovizualizaci a výzkum sledování pohybu očí. Ačkoli v tomto přehledu nebyly identifikovány žádné studie založené na AR, konvergence sledování pohybu očí s technologiemi AR a smíšené reality (MR) se jeví jako logický další krok. Tyto platformy nabízejí příležitosti ke studiu prostorového chování v kontextově citlivých prostředích, jako je navigace v interiérech, situační povědomí v chytrých městech nebo navigační systémy v muzeích. Současně roste zájem o multimodální integraci, kde je eye-tracking kombinován s hlasovým vstupem, rozpoznáváním gest, fyziologickým snímáním nebo zaznamenáváním chování. Tyto vývojové trendy naznačují budoucnost, ve které eye-tracking nebude samostatnou metodou, ale součástí širšího ekosystému uživatelské analytiky.

Veškerá podkladová data pro DC1 jsou k dispozici na datovém úložišti disertační práce:

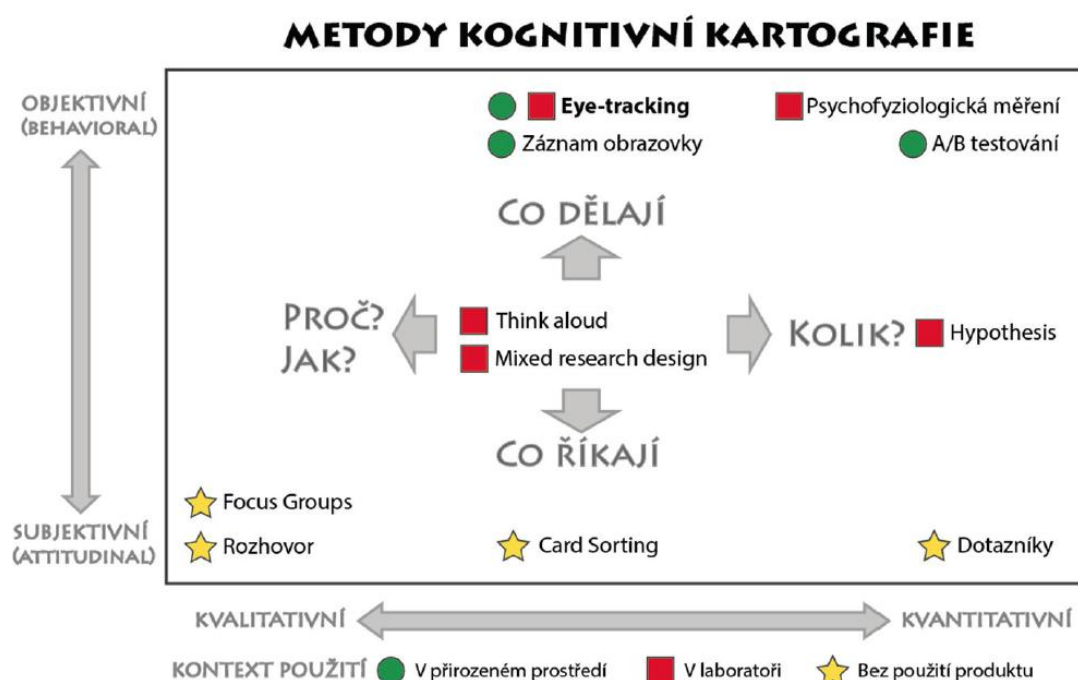
Vaníček, Tomáš. *Datové úložiště disertační práce: Hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking* [online]. Olomouc, 2026. Poslední aktualizace 21. 05. 2026 [cit. 2026-05-21]. Dostupné z: <https://vanicektomas.github.io/data-disertace/>

DC2

6 VÝBĚR A SYNTÉZA METOD (DC2)

Tato kapitola představuje druhý dílčí cíl disertační práce (DC2) a přímo navazuje na předchozí systematické mapování literatury (DC1). Zatímco DC1 byl zaměřen na identifikaci, třídění a kritickou analýzu existujících studií využívajících eye-tracking při hodnocení IKV, tato kapitola se posouvá od deskriptivní roviny k **rovině analyticko-syntetické**. Jejím cílem je na základě poznatků získaných v DC1 systematicky posoudit dostupné **metodické přístupy**, identifikovat jejich **silné a slabé stránky**, a především **formulovat rámec** pro jejich vhodnou aplikaci v kontextu hodnocení interaktivních map.

Kognitivní kartografie dnes využívá široké spektrum výzkumných metod a technik pro zjišťování použitelnosti map (**Obrázek 31**). Různým způsobům, jak hodnotit kartografické produkty, se věnoval například Bláha (2010). Celá řada metod je dnes také přehledně vizualizována na internetovém webu *100metod*⁸. Tyto metody lze dále klasifikovat podle různých hledisek, přičemž jedno z relevantních členění uvádí Rohrer (2022), který rozlišuje přístupy na subjektivní a objektivní, resp. kvalitativní a kvantitativní. Toto rozdělení je klíčové i pro oblast hodnocení kartografických vizualizací.



Obrázek 31: Přehled metod kognitivní kartografie (zdroj: Popelka (2018)).

⁸ *100 metod* [online]. Masarykova univerzita, Brno, 2023 [cit. 2023-06-07].
Dostupné z: <https://kisk.phil.muni.cz/100metod>

Kvalitativní metody se zaměřují na hlubší porozumění uživatelskému chování, zkušenostem a percepci. Typicky zahrnují pozorování, rozhovory či verbalizační techniky, které umožňují identifikovat konkrétní problémy a bariéry⁹ z pohledu uživatele. Naproti tomu **kvantitativní metody** usilují o objektivní měření a kvantifikaci vybraných aspektů použitelnosti, jako je čas řešení úloh, chybovost či výkonnost. Tyto přístupy poskytují statisticky analyzovatelná data a umožňují zobecnění výsledků. V kontextu současného výzkumu se však ukazuje jako nejvhodnější **kombinace obou přístupů**, která umožňuje dosáhnout komplexního a vyváženého porozumění interakci uživatele s mapovým rozhraním.

Na tomto teoreticko-metodologickém východisku staví vlastní obsah kapitoly. Jejím hlavním cílem je provést **systematickou analýzu a komparaci metod** využitelných pro hodnocení použitelnosti IKV, se zvláštním důrazem na jejich **kombinovatelnost s metodou eye-tracking**. Vedle samotného rozboru eye-tracking metrik, analytických možností a dostupných softwarových nástrojů, budou diskutovány i další relevantní přístupy identifikované v rámci DC1. Jedná se zejména o verbalizační metody (např. think-aloud či talk-aloud), dotazníková šetření, logování uživatelských interakcí a rovněž o doplňkové fyziologické metody, jako je EEG či měření stresu. Tyto metody budou analyzovány nejen samostatně, ale především z hlediska jejich **vzájemné komplementarity** a potenciálu pro **metodologickou triangulaci**.

Klíčovým přínosem této kapitoly nebude pouze souhrnný přehled metod, ale především jejich syntéza do podoby **analytického rámce**, který umožní systematicky rozhodovat o vhodnosti jejich použití v závislosti na charakteru výzkumného problému. Zohledněny budou zejména dva zásadní faktory: typ použitého eye-tracking zařízení a povaha kartografického stimulu (např. statický vs. dynamický, resp. interaktivní). Výstupem bude návrh schéma, které poskytne metodologické vodítko pro návrh experimentů zaměřených na hodnocení použitelnosti IKV v rámci DC3.

Závěrečná část kapitoly se zaměří na **výběr konkrétních metod**, které budou aplikovány v navazujícím dílčím cíli (DC3), tedy v rámci realizace pěti případových studií. Tento výběr bude explicitně zdůvodněn na základě poznatků z literatury i analytických závěrů této kapitoly. Navržený rozhodovací rámec bude v těchto studiích empiricky ověřen a v závěrečné části disertační práce (kap. Výsledky) dále rozvinut a zpřesněn do finální podoby. Tímto způsobem kapitola DC2 představuje klíčový most mezi teoreticko-analytickou částí práce (DC1) a její praktikou částí (DC3).

⁹ Typicky projekt *Identifikace bariér v procesu komunikace prostorových sociálně-demografických informací*: Projekt GAČR č. 23-06187S [online]. Univerzita Palackého v Olomouci a Masarykova univerzita v Brně, 01/2023—12/2025n. l. [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <http://eyetracking.upol.cz/bariery/>

6.1 Metriky pro analýzu očních pohybů

Analýza očních pohybů představuje jeden ze základních metodologických pilířů současného eye-tracking výzkumu. Oční pohyby nejsou náhodné, ale jsou výsledkem komplexních kognitivních procesů zahrnujících výběr cíle, plánování pohybu očí i samotnou realizaci. Jejich analýza proto může poskytovat objektivní a kvantifikovatelné informace o kvalitě, předvídatelnosti a konzistenci těchto skrytých procesů (Van Der Stigchel a kol., 2007). V kontextu hodnocení IKV je tento předpoklad zásadní, protože umožňuje sledovat, jak uživatel rozděluje vizuální pozornost mezi samotný mapový obsah, ovládací prvky rozhraní a další podpůrné komponenty, jako jsou legenda, panel vrstev, navigační nástroje nebo zadání úlohy. Tato podkapitola nevychází pouze z obecných eye-tracking metrik popsanych v literatuře, ale zaměřuje se především na ty přístupy k analýze očních pohybů, které byly identifikovány v rámci dílčího cíle DC1 při systematickém mapování dosavadního výzkumu. Jejím cílem je proto nejen stručně představit základní metody a metriky používané pro eye-tracking, ale zároveň ukázat jejich význam pro hodnocení použitelnosti IKV a doložit jejich relevanci četností jejich výskytu v analyzovaných studiích. Tím se tato část opírá jak o obecné metodologické poznatky, tak o empirický přehled současné výzkumné praxe pro eye-tracking v kognitivní kartografii.

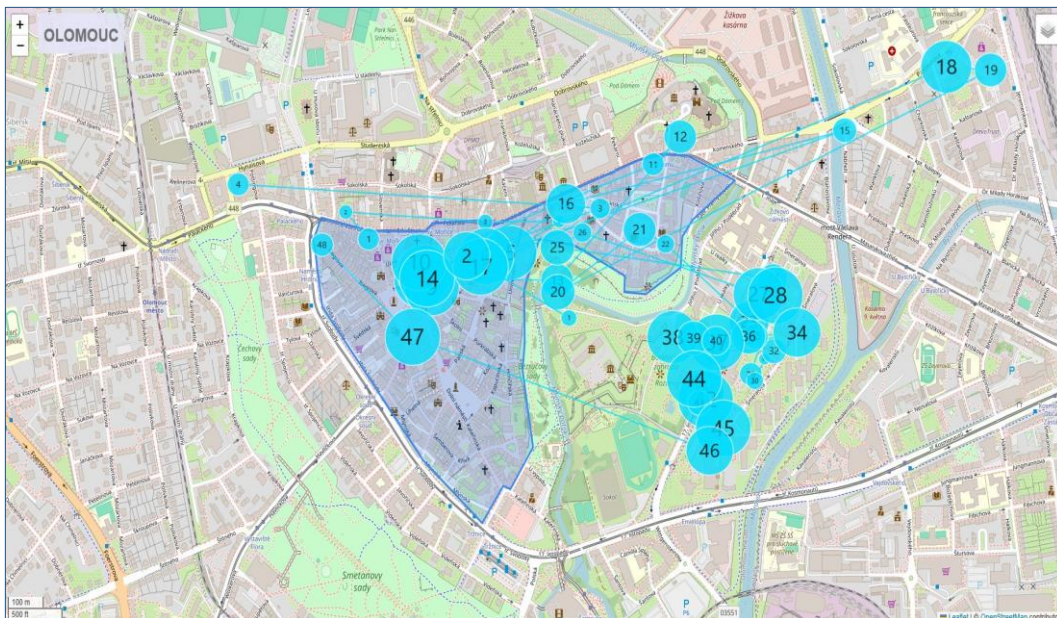
Základním vstupem pro analýzu eye-tracking dat jsou **surová data** obsahující časové značky a souřadnice bodu pohledu v rovině obrazovky. Pro většinu analýz je však nezbytné tato data dále zpracovat a identifikovat z nich **fixace a sakády** pomocí vhodných detekčních algoritmů. Právě na této úrovni vznikají metriky, které jsou následně využívány ke kvantitativnímu i kvalitativnímu porovnávání chování participantů. Holmqvist a kol. (2011) uvádějí více než **120 eye-tracking metrik**, přičemž v praxi se pravidelně využívá pouze omezená skupina těch nejlépe interpretovatelných a metodologicky ustálených. Také výsledky DC1 ukázaly, že v oblasti hodnocení IKV se opakovaně objevuje především několik základních analytických přístupů, zatímco řada pokročilejších metrik se vyskytuje pouze výjimečně.

Nejčastěji identifikovanou skupinou metrik v rámci DC1 byly **fixace**, konkrétně jejich **počet a délka** (identifikováno v 51 studiích). Počet fixací vyjadřuje, kolik fixací bylo zaznamenáno během určitého časového úseku nebo v definované oblasti zájmu (Holmqvist a kol., 2011). Vyšší počet fixací bývá zpravidla interpretován jako projev **nižší efektivity vizuálního hledání** nebo **vyšší obtížnosti zpracování informace**; v oblasti uživatelských rozhraní může také signalizovat méně vhodné grafické či funkční uspořádání prvků (Goldberg a Kotval, 1999). V případě interaktivních map může být tato metrika užitečná například při hodnocení toho, zda uživatel snadno nachází legendu, přepínač vrstev nebo jiný důležitý ovládací prvek, nebo zda naopak v rozhraní zbytečně vizuálně „bloudí“. **Délka fixace** pak udává dobu, po kterou zůstává zrak relativně stabilní v jedné pozici. Delší fixace mohou souviset s hlubším kognitivním zpracováním, vyšší náročností interpretace nebo větší nejistotou při rozhodování (Rayner, 1978; Salthouse a Ellis, 1980). V mapovém kontextu mohou delší fixace signalizovat například obtížnou interpretaci tematického znaku, nízkou srozumitelnost legendy nebo problematické rozhraní.

Vedle absolutního počtu fixací lze využít také **frekvenci fixací**, tedy počet fixací za jednotku času. Tato metrika poskytuje relativní ukazatel nezávislý na celkové délce záznamu, a je proto vhodná pro porovnávání participantů nebo úloh s odlišnou dobou řešení. Přestože frekvence fixací nebyla v DC1 evidována zvlášť jako samostatná kategorie, lze ji považovat za logické

rozšíření základní analýzy fixací. Pro hodnocení IKV může být užitečná například při porovnávání intenzity vizuální aktivity mezi různými typy úloh nebo různými verzemi mapového rozhraní.

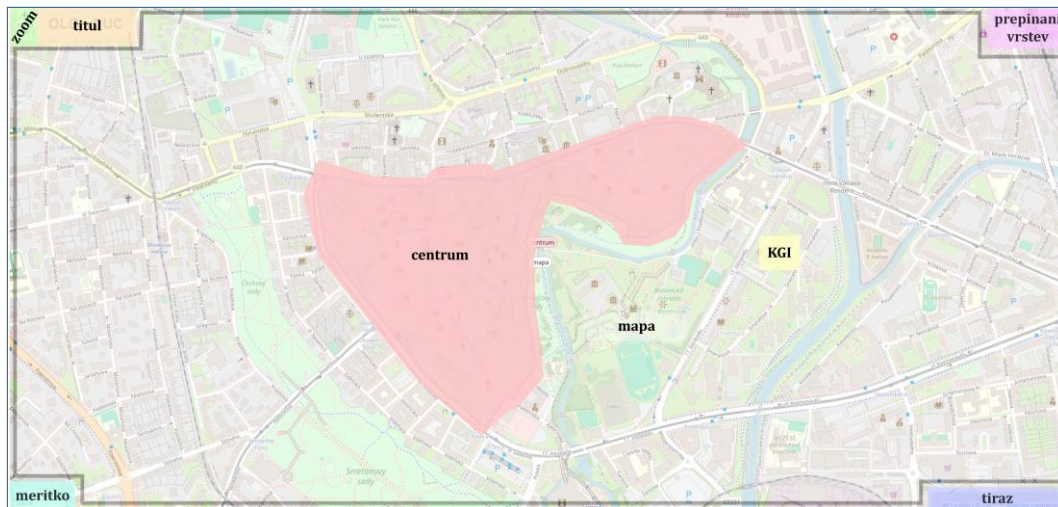
Druhou velmi významnou skupinou přístupů byly **sekvence fixací** neboli **scanpaths** (identifikováno ve 37 studiích). Scanpath představuje trajektorii očních pohybů tvořenou **posloupností fixací a sakád** (Salvucci a Goldberg, 2000) – **Obrázek 32**. Obvykle se vizualizuje jako sada uzlů a spojnic překrytých přes daný stimul, přičemž velikost uzlů odpovídá délce fixací (Goldberg a Helfman, 2010). V kartografickém výzkumu má scanpath význam zejména při analýze dynamiky práce s interaktivní mapou, protože umožňuje rekonstruovat pořadí, v němž uživatel navštěvoval mapové pole, legendu, ovládací panel nebo další části rozhraní. Může tak odhalit například to, zda uživatel nejprve zkoumá obsah mapy a následně hledá pomoc v legendě, nebo naopak opakovaně přeskakuje mezi více prvky, což může signalizovat nejistotu či méně intuitivní návrh aplikace. Současně je však třeba dodat, že u delších a složitějších interakcí bývají scanpaths velmi nepřehledné, a proto jsou často vhodnější pro detailní kvalitativní interpretaci než pro plošné srovnávání většího počtu participantů.



Obrázek 32: Ukázka trajektorie očního pohybu (*scanpath*) v mapě.

Velmi často byla v analyzovaných studiích využívána také **AOI analýza** (*Areas of Interest*) (identifikováno ve 29 studiích). AOI analýza přiřazuje oční pohyby ke konkrétním oblastem vizuální scény a umožňuje získat **lokálně interpretovatelné metriky**, například počet fixací, dobu do první fixace, dobu setrvání pohledu nebo počet návratů do dané oblasti (Hessels a kol., 2016; Holmqvist a kol., 2011). V případě IKV mohou AOI představovat mapové pole, legendu, panel vrstev, vyhledávací pole, nástrojovou lištu či konkrétní kartografické prvky (**Obrázek 33**). Právě v tomto směru je AOI analýza přínosná pro hodnocení použitelnosti, protože umožňuje přesněji určit, které části rozhraní přitahují pozornost, které jsou přehlíženy a které naopak vyžadují opakované vrácení pohledu. Současně je však nutné zdůraznit, že definování AOI je výrazně jednodušší u statických stimulů než u interaktivních map, kde se stimul v čase mění.

U dynamických a interaktivních scén je proto nutné chápat AOI nejen prostorově, ale i časově, což ale zvyšuje nároky na analýzu a interpretaci.



Obrázek 33: Ukázka vytvořených AOI v mapě.

Významnou metrikou v rámci AOI analýzy je **time-to-first-fixation** (TTFF) (identifikováno ve 13 studiích). TTFF vyjadřuje čas od začátku prezentace stimulu do okamžiku, kdy je v dané oblasti zaznamenána první fixace (Holmqvist a kol., 2011). Kratší TTFF obvykle znamená vyšší schopnost daného prvku upoutat pozornost nebo vyšší efektivitu vizuálního vyhledávání (Jacob a Karn, 2003). V prostředí interaktivních map je tato metrika cenná například při hodnocení toho, zda uživatel rychle nalezne legendu, vyhledávací nástroj, ovládací tlačítko nebo jiný klíčový prvek rozhraní. Krátký čas do první fixace může naznačovat dobrou vizuální hierarchii rozhraní, zatímco delší hodnoty mohou poukazovat na nízkou nápadnost nebo nevhodné umístění prvku.

Dalším relevantním ukazatelem je **doba setrvání pohledu** (*dwell time*) (identifikováno ve třech studiích). Dwell time vyjadřuje dobu, po kterou se zrak v rámci jedné návštěvy pohybuje uvnitř dané AOI, přičemž zahrnuje fixace, sakády i případné krátké návraty v rámci jedné návštěvy (Holmqvist a kol., 2011; Tullis a Albert, 2013). V kartografických aplikacích tato metrika dobře ukazuje, kolik vizuální kapacity uživatel věnuje jednotlivým komponentám rozhraní. Delší dwell time nad legendou může znamenat, že uživatel skutečně vyhodnocuje význam mapových znaků, ale také to, že je legenda obtížně srozumitelná. Podobně delší dwell time nad panelem vrstev může souviset s jeho složitostí nebo s horší informační architekturou aplikace.

Těsně související s AOI analýzou je také **počet návratů do oblasti zájmu** (*revisit count*), který ukazuje, jak často se uživatel k určitému prvku vrací. Tato metrika nebyla v DC1 evidována jako samostatná kategorie, přesto má v prostředí interaktivních map významnou interpretační hodnotu. Časté návraty k legendě mohou signalizovat potřebu opakované kontroly významu znaků, zatímco opakované přechody mezi mapou a panelem nástrojů mohou například naznačovat méně intuitivní způsob ovládání.

V analyzovaných studiích byly dále poměrně často využívány **sakády** (identifikováno v 19 studiích). Sakáda je rychlý pohyb oka mezi dvěma fixacemi a sama o sobě neodráží

zpracování vizuální informace, ale přesun pozornosti. V kartografii může analýza sakád pomoci pochopit, jakým způsobem uživatel prohledává mapu a přilehlé prvky rozhraní. Vhodná je zejména tehdy, pokud je cílem rozlišit mezi cíleným a systematickým vizuálním prohledáváním na jedné straně a chaotickým nebo neefektivním chováním na straně druhé.

Samostatně byla v DC1 sledována také **amplituda sakád** nebo **délka trajektorie pohledu** (*scanpath length*) (identifikováno v šesti studiích). Amplituda sakády vyjadřuje vzdálenost, kterou oko při přesunu mezi dvěma fixacemi urazí (Holmqvist a kol., 2011). Kratší amplitudy mohou souviset s vyšší obtížností úlohy nebo s vyšší kognitivní zátěží, zatímco delší sakády mohou ukazovat na širší prohledávání celé vizuální scény. U interaktivních map může být tato metrika užitečná například při rozlišení, zda uživatel detailně analyzuje lokální část mapy, nebo zda rychle přeskakuje mezi mapovým polem a rozhraním. Do stejného interpretačního rámce spadá i metrika *scanpath length*, která vyjadřuje celkovou délku trajektorie pohledu a může signalizovat obtížnost otázky nebo nižší přehlednost stimulu (Goldberg a Helfman, 2011).

Některé studie se zaměřovaly také na **geometrii trajektorie pohledu** (identifikováno ve třech studiích). Tento přístup jde nad rámec prosté vizualizace scanpath a snaží se formálně popsat tvar, směr nebo strukturu trajektorie pohledu. Pro IKV může být tento přístup přínosný při analýze různých strategií práce s mapou, například zda uživatel postupuje systematicky, zda se orientuje podél určitých os rozhraní nebo zda vykazuje výrazně nepravidelné vzorce pohledu. Ačkoli jde v kartografickém výzkumu zatím o méně častý přístup, může být užitečný zejména při srovnávání různých typů uživatelů nebo typů úloh.

Vedle fixací a sakád se v některých studiích objevily i fyziologicky orientované ukazatele, zejména **dilatace zornice** (identifikováno ve čtyřech studiích). Průměr zornice a jeho změny bývají spojovány s kognitivní zátěží. Základní metrikou je střední hodnota průměru zornice, případně změna vůči bazální linii. Sofistikovanější ukazatele, jako je *Index of Cognitive Activity* (ICA) nebo *Index of Pupillary Activity* (IPA), se snaží zachytit okamžité změny pupilárního signálu související s mentální náročností (Duchowski a kol., 2018; Marshall, 2002). V hodnocení interaktivních map mohou pupilometrické ukazatele doplnit tradiční analýzu fixací a sakád, zejména pokud je cílem odhadnout, které typy úloh nebo které prvky rozhraní zvyšují kognitivní zátěž uživatele. Současně je však nutné zdůraznit, že pupilární data jsou velmi citlivá na změny osvětlení, kontrast a charakter zobrazovaného obsahu.

Méně často byl v DC1 zaznamenán **počet mrknutí** (*blink rate*) (identifikováno ve dvou studiích). Frekvence mrkání bývá v literatuře spojována s únavou, mírou soustředění či vnitřním stavem jedince, přesto je silně ovlivněna experimentálními podmínkami a nelze pro ni stanovit jednu univerzální normu (Doughty, 2002; Ranti a kol., 2020). V kontextu interaktivních map může být tato metrika spíše doplňková, například při delších experimentech nebo při sledování mentální únavy při náročných úlohách. Ještě okrajověji se v DC1 objevila **rychlost pohybu očí**, která byla identifikována pouze v jedné studii. Přestože může mít význam v psychofyziologickém nebo neurologickém výzkumu, pro hodnocení použitelnosti mapových rozhraní má zpravidla menší přímou interpretační hodnotu.

Specifickou, ale pro interaktivní mapy velmi důležitou kategorií je **expertní interpretace dat** (identifikováno v pěti studiích). Tento přístup spočívá v detailním prohlížení nahraných videozáznamů nebo záznamů pohledu a jejich odborném posouzení. Nejde tedy o metriku v pravém slova smyslu, ale o kvalitativní analytický přístup, který může být zvláště cenný

u dynamických stimulů a komplexních interakcí. U interaktivních map umožňuje zachytit situace, které by čistě kvantitativní metriky nemusely dostatečně vystihnout, například váhání uživatele, chybnou interpretaci prvku rozhraní, ztrátu orientace po změně měřítka nebo opakované pokusy o nalezení určité funkce. Tento přístup je proto metodologicky relevantní zejména tam, kde se stimul v čase proměňuje a klasické AOI analýzy narážejí na své limity.

Vedle samotných metrik je třeba zmínit také základní **vizualizační přístupy** k analýze eye-tracking dat, které byly v DC1 využívány velmi často. Nejčastější byly **heatmapy** (identifikováno ve 35 studiích). Heatmapa zobrazuje prostorové rozložení fixací nad stimulem a poskytuje rychlý přehled o tom, které části obrazu přitahovaly více či méně pozornosti. Její hlavní výhodou je intuitivní srozumitelnost, nevýhodou naopak to, že nezachycuje časovou posloupnost pohledu (Grindinger a kol., 2011). V kartografických studiích jsou heatmapy vhodné především pro orientační a agregovanou interpretaci, například při zjišťování, zda se pozornost uživatelů soustředila především na mapové pole, nebo na prvky rozhraní.

Doplňkově byla v DC1 identifikována také **distribuce pohledů** (*gaze distribution*) (identifikováno ve 13 studiích), která představuje obecnější způsob prostorového shrnutí pohledu nad stimulem. Tento přístup může být přínosný při porovnávání skupin participantů nebo různých podmínek experimentu, protože umožňuje sledovat, jak se vizuální pozornost rozkládá mezi jednotlivé části mapové aplikace. Méně časté byly různé specializované přístupy, jako nástroje pro vizuální analýzu (dvě studie), FlowMap vizualizace (jedna studie), FDP (*Fixation Distance Plot*) (jedna studie), grafy interakcí (jedna studie) nebo 3D analýza pohledu (jedna studie).

Některé další analytické přístupy popsané v obecné literatuře o metodě eye-tracking, například přechodové matice pohledu, hustota přechodových matic nebo entropie přechodů mezi AOI, nebyly v rámci DC1 evidovány jako samostatné kategorie. To však neznamená, že jsou metodologicky bezvýznamné. Naopak mohou být velmi přínosné zejména při analýze strategií vizuálního prohledávání v komplexních mapových rozhraních, kde je žádoucí zachytit nejen to, které oblasti uživatel navštívil, ale i jak mezi nimi přecházel.

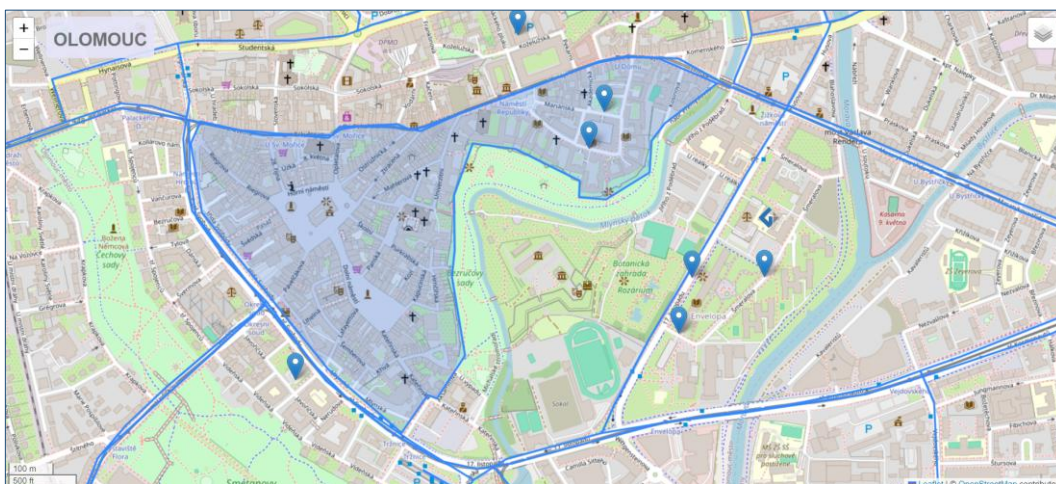
Z metodologického hlediska je nutné zdůraznit, že ne všechny uvedené metriky a přístupy jsou stejně vhodné pro všechny typy stimulů. U statických stimulů je analýza obvykle přímočařejší, protože vizuální scéna se v čase nemění a oblasti zájmu lze definovat relativně snadno. Naproti tomu u interaktivních map je situace podstatně složitější, protože stimul se proměňuje v důsledku uživatelských akcí. AOI je zde proto nutné chápat jako prostorově-časové entity, jejichž poloha i význam závisí na konkrétním stavu rozhraní. Tento problém představuje jeden z klíčových metodologických limitů metody eye-tracking v kartografickém výzkumu, ale současně i významnou výzkumnou výzvu pro tuto disertační práci.

Lze tedy shrnout, že analýza očních pohybů nabízí **široké spektrum metod a metrik**, z nichž každá zachycuje jiný aspekt vizuálního chování uživatele. Výsledky DC1 současně ukázaly, že v dosavadním výzkumu hodnocení IKV převažují zejména analýzy fixací, scanpaths, AOI, sakád a heatmap, zatímco pokročilejší či experimentálně náročnější přístupy se objevují spíše výjimečně. Pro potřeby této disertační práce se jako nejrelevantnější jeví především takové metody, které umožňují interpretovat vztah mezi vizuální pozorností, strukturou mapového rozhraní a úspěšností uživatele při plnění úloh. Právě tato kombinace kvantitativních a kvalitativních přístupů bude dále tvořit důležitý základ pro metodologický návrh navazujících případových studií.

6.2 Analytické instrumentárium pro analýzu očních pohybů

Digitální prostředky pro eye-tracking nelze chápat pouze jako technické rozhraní mezi měřicím zařízením a výzkumníkem, ale jako integrální součást metodologického návrhu celé studie. V této podkapitole jsou proto představeny **nástroje** relevantní pro potřeby disertační práce, přičemž jsou zahrnuty výhradně ty **softwarové prostředky**, které měl autor práce **možnost prakticky vyzkoušet** v rámci dostupného vybavení v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP, potažmo další volně dostupné nástroje. Přestože existuje široké spektrum dalších nástrojů a platforem, které nejsou v této kapitole zahrnuty, jejich opomenutí není dáno jejich nižší relevancí, ale absencí přímé empirické zkušenosti autora s jejich využitím. Zároveň je třeba zdůraznit, že zde prezentované instrumentárium je popsáno především v deskriptivní rovině s cílem seznámit čtenáře se základními možnostmi jednotlivých nástrojů. Podrobnější popis jejich praktického využití, konkrétních analytických postupů a procesů vyhodnocování dat je následně rozveden až v rámci jednotlivých případových studií v části DC3.

Pro účely praktického ověření funkcionality jednotlivých nástrojů byla současně vytvořena **jednoduchá experimentální webová mapová aplikace**¹⁰ (**Obrázek 34**) pomocí knihovny *Leaflet*, která sloužila jako jednotný testovací stimul. Nad touto aplikací byl vždy realizován zjednodušený modelový eye-tracking experiment s využitím fiktivních dat tří participantů, přičemž každý záznam odpovídal přibližně jedné minutě interakce. Tato syntetická data byla následně importována do jednotlivých analyzovaných nástrojů s cílem ověřit jejich analytické možnosti, pracovní postupy a limity při zpracování dat odpovídajících interaktivním kartografickým vizualizacím. Prezentované ukázky v této kapitole proto odpovídají reálnému prostředí daných softwarů při práci s těmito testovacími daty (jedinou výjimkou je platforma Gazepoint Analysis, kde je ukázka doplněna zpětně z PS4).



Obrázek 34: Náhled na vytvořenou interaktivní mapu pro testovací eye-tracking experiment.

Na jedné straně lze rozlišit **komplexní systémy**, které pokrývají jak návrh experimentu a záznam dat, tak i jejich základní analýzu, a na straně druhé **specializované aplikace**

¹⁰ **Vaníček, Tomáš.** Leaflet – interaktivní mapa. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://vanicektomas.github.io/leaflet.html>

zaměřené pouze na vybraný analytický problém. Z metodologického hlediska přitom není rozhodující jen to, zda dané zvolené prostředí umožňuje vytvářet heatmapy nebo oblasti zájmu, ale také zda podporuje práci s dynamickými oblastmi zájmu, časovými úseky, mapováním pohledu, exportem surových i agregovaných dat a návazností na další analytická prostředí. Zároveň volba konkrétního nástroje musí odpovídat výzkumné otázce, rozpočtu, zavedeným pracovním postupům i technickým kompetencím výzkumného týmu. Současně platí, že většina běžně používaných programových celků sama o sobě neřeší plnohodnotnou statistickou inferenci, takže finální zpracování dat zpravidla pokračuje v jiném prostředí.

Pro výzkum použitelnosti IKV metodou eye-tracking je účelné toto instrumentarium klasifikovat podle **funkční role v procesu analýzy**. V praxi lze identifikovat komplexní platformy, nástroje pro mobilní eye-tracking, specializované nástroje pro sekvenční a komparační analýzu, nástroje pro webcam-based eye-tracking pro vzdálený sběr dat a nakonec GIS-orientovaná řešení. Důkladná znalost funkcionality těchto prostředků je pro potřeby disertační práce opravdu důležitá, neboť IKV zkrátka není statickým stimulem. S každým přiblížením, posunem či filtrováním vrstev se mění nejen poloha objektů, ale i sémantický význam fixací v čase. Mapový výzkum proto vyžaduje pokročilou podporu dynamických oblastí zájmu, referenčního mapování pohledu a georeferencování dat, což zdaleka přesahuje běžný export například heatmap a fixací.

6.2.1 Komplexní platformy pro eye-tracking

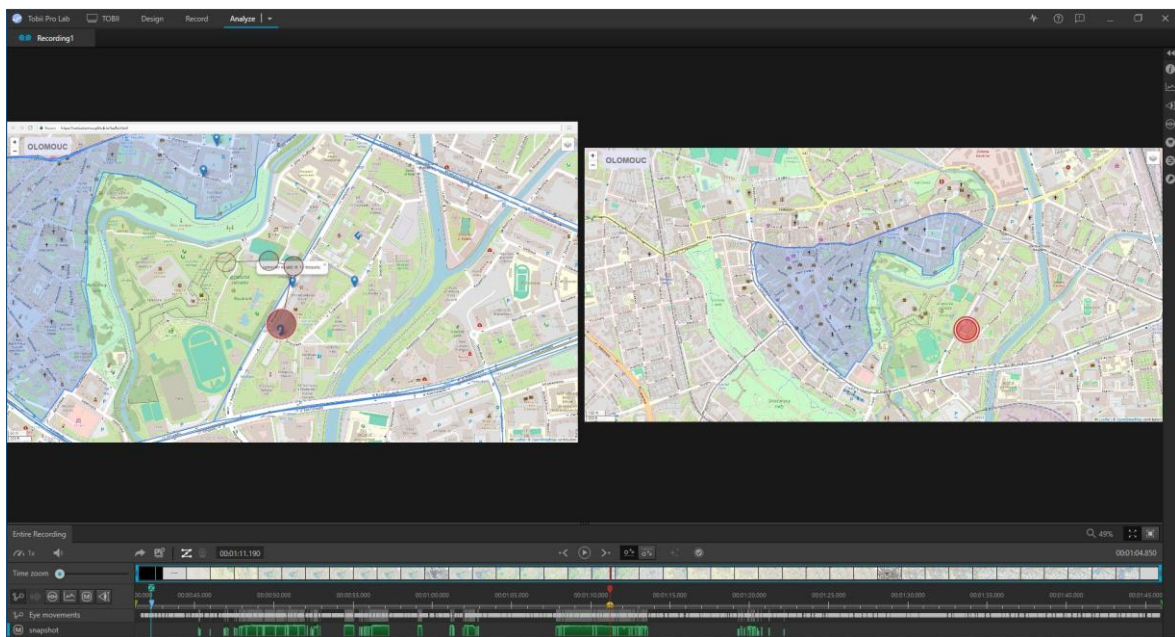
Na trhu s technologiemi pro sledování pohybu očí zaujímá dominantní postavení společnost Tobii, jejíž ekosystém je v akademickém i aplikačním výzkumu široce etablován. Součástí eye-tracking laboratoře na Katedře geoinformatiky je stacionární eye-tracker **Tobii Pro Spectrum**¹¹, a k tomu navazující klíčový software **Tobii Pro Lab**¹². Ten představuje komplexní platformu integrující návrh experimentu, sběr dat i jejich následnou analýzu. Tento nástroj podporuje široké spektrum experimentálních scénářů, včetně studií založených na sledování obrazovky, webového obsahu, záznamů obrazovky i pro mobilní eye-tracking. V analytické rovině nabízí standardizované metriky očních pohybů (např. fixace, sádky), práci s oblastmi zájmu (AOI) včetně jejich dynamických variant, stejně jako možnost integrace s dalšími fyziologickými daty. Z metodologického hlediska jsou pro výzkum IKV zvláště relevantní funkce asistovaného a manuálního mapování pohledu a práce s časově definovanými úseky zájmu. **Asistované mapování** umožňuje převod záznamu pohledu dynamických eye-tracking dat na referenční obraz (tzv. snapshot) – **Obrázek 35**. Tento přístup usnadňuje dekompozici uživatelské interakce na jednotlivé stavy rozhraní (např. výchozí zobrazení, změna měřítka, otevření legendy či aktivace filtru) a jejich následné systematické vyhodnocení.

¹¹ **Tobii**. Tobii Pro Spectrum – screen-based eye tracker. [online]. [cit. 2026-04-21].

Dostupné z: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-spectrum>

¹² **Tobii**. Tobii Pro Lab – behavioral research software. [online]. [cit. 2026-04-21].

Dostupné z: <https://www.tobii.com/products/software/behavior-research-software/tobii-pro-lab>

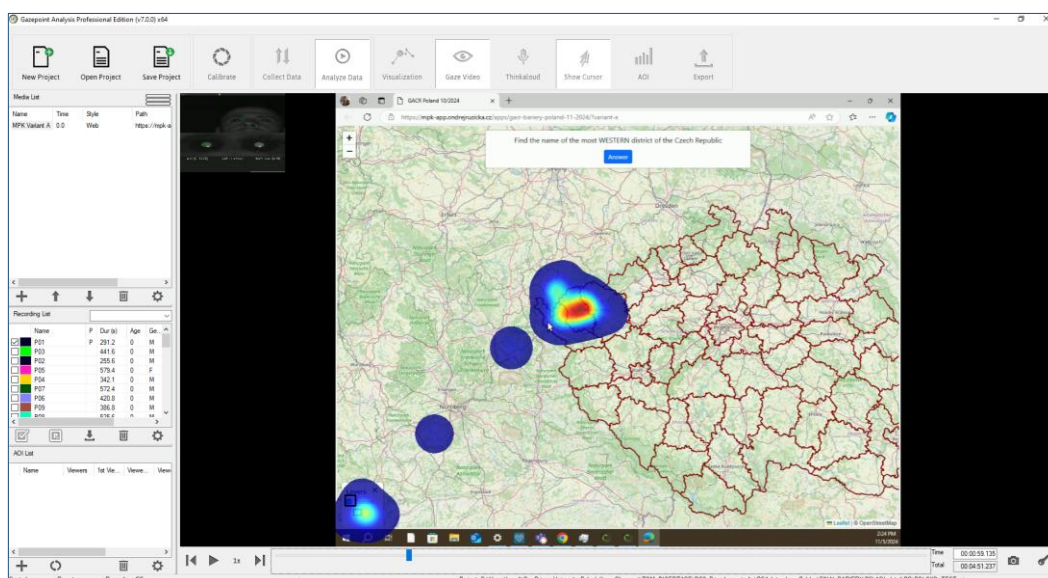


Obrázek 35: Náhled na prostředí Tobii Pro Lab a funkci asistovaného mapování fixací, správně přiřazená fixace z videozáznamu (vlevo) do statického obrázku (vpravo).

Software tak nepředstavuje pouze nástroj pro tradiční laboratorní experimenty, ale i pro analýzu komplexních, dynamicky se měnících stimulů, typických například pro webové mapové aplikace. Omezením zůstává relativně silná vazba na hardwarový a softwarový ekosystém výrobce a skutečnost, že pokročilé statistické zpracování dat je zpravidla nutné realizovat v externích analytických nástrojích.

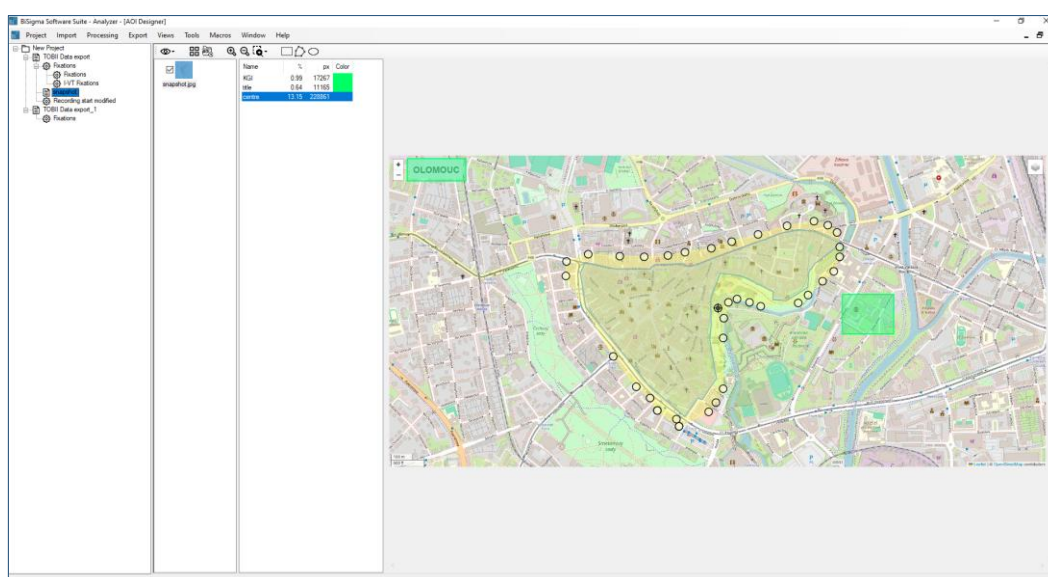
Vedle tohoto ekosystému je vhodné zmínit také software **Gazepoint Analysis**¹³ (např. verze Professional – **Obrázek 36**), který představuje alternativní nástroj pro zpracování eye-tracking dat, využívaný zejména ve spojení se zařízeními Gazepoint. Tento software je orientován především na analýzu zaznamenaných dat a poskytuje základní funkcionality pro práci s oblastmi zájmu, výpočet standardních metrik (např. počet a délka fixací) a export dat do tabulkových formátů pro další zpracování. Z praktického hlediska umožňuje Gazepoint Analysis pracovat s AOI na úrovni jednotlivých záznamů z experimentu a následně z těchto oblastí extrahovat kvantitativní charakteristiky pozornosti. Výstupy lze exportovat ve formátu CSV, což umožňuje jejich následnou integraci do dalších analytických nástrojů a prostředí. Zároveň software podporuje kombinaci kvantitativního vyhodnocení s expertní interpretací záznamů, například prostřednictvím vizuální kontroly průběhu řešení úloh nebo identifikace specifických vzorců chování uživatelů.

¹³ **Gazepoint.** Gazepoint Analysis Professional Edition Software. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://www.gazept.com/product/gazepoint-analysis-professional-edition-software>



Obrázek 36: Náhled na prostředí GazePoint Analysis Professional Edition (v.7.0.0) pro PS4.

Specifickou pozici pak zaujímá software **BiSigma**¹⁴ (**Obrázek 37**), který sice stojí poněkud mimo hlavní proud komerčně rozšířených řešení, avšak z metodologického hlediska nabízí vysokou míru flexibility. Umožňuje propojení očních pohybů s dalšími fyziologickými daty, podporuje statické i dynamické oblasti zájmu, dávkové zpracování i tvorbu vlastních analytických workflow prostřednictvím maker a otevřeného skriptování. Tyto možnosti však současně implikují vyšší nároky na uživatele, zejména z hlediska osvojení prostředí, konfigurace analytických postupů a interpretace výsledků, ve srovnání s uživatelsky přímočařejšími systémy. Celková práce s produktem je tak neintuitivní a často problematická.



Obrázek 37: Náhled na prostředí BiSigma Software Suite (v.2.0.12) ve fázi tvorby AOI.

¹⁴ **BiSigma**. Software. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://bisigma.de/products/software/>

Poslední testovanou komplexní platformou pro eye-tracking je **Blickshift Analytics**¹⁵, který představuje moderně koncipované prostředí zaměřené především na pokročilou analýzu očních pohybů s důrazem na automatizaci a škálovatelnost zpracování dat. Tento nástroj je navržen jako modulární platforma umožňující import a analýzu dat z různých typů eye-tracking zařízení, přičemž jeho silnou stránkou je zejména využití algoritmických přístupů a prvků strojového učení pro identifikaci vzorců vizuální pozornosti. Z analytického hlediska nabízí standardní metriky očních pohybů (např. fixace, sádky), avšak důraz je kladen především na jejich agregaci a interpretaci ve vztahu k definovaným analytickým cílům. Platforma umožňuje pokročilou práci s oblastmi zájmu, včetně jejich dynamických variant, a podporuje analýzu komplexních vizuálních scén. Významnou funkcionalitou je rovněž možnost automatizovaného zpracování větších datových souborů a generování výstupů ve formě vizualizací a reportů. Z metodologického pohledu lze tento nástroj chápat jako prostředí orientované na efektivní zpracování a interpretaci dat. Zároveň však jeho využití vyžaduje určitou míru porozumění interním analytickým procesům, zejména v případech, kdy jsou využívány pokročilé automatizované postupy.

6.2.2 Nástroje pro mobilní eye-tracking

V oblasti pro mobilní eye-tracking představuje klíčové řešení platforma **Pupil Cloud**¹⁶ od společnosti Pupil Labs. Katedra geoinformatiky disponuje mobilními eye-tracking brýlemi **Neon**¹⁷. Software Pupil Cloud je webově orientované prostředí, které integruje správu dat, jejich vizualizaci i pokročilé analytické nástroje. Z pohledu kartografického výzkumu jsou zásadní zejména funkce umožňující mapování pohledu na referenční obraz, mapování pomocí markerů a tvorbu heatmap ve vazbě na definované oblasti zájmu. Mapování na referenční obraz umožňuje automatický převod zaznamenaných bodů pohledu a fixací na statický referenční snímek (**Obrázek 38**).

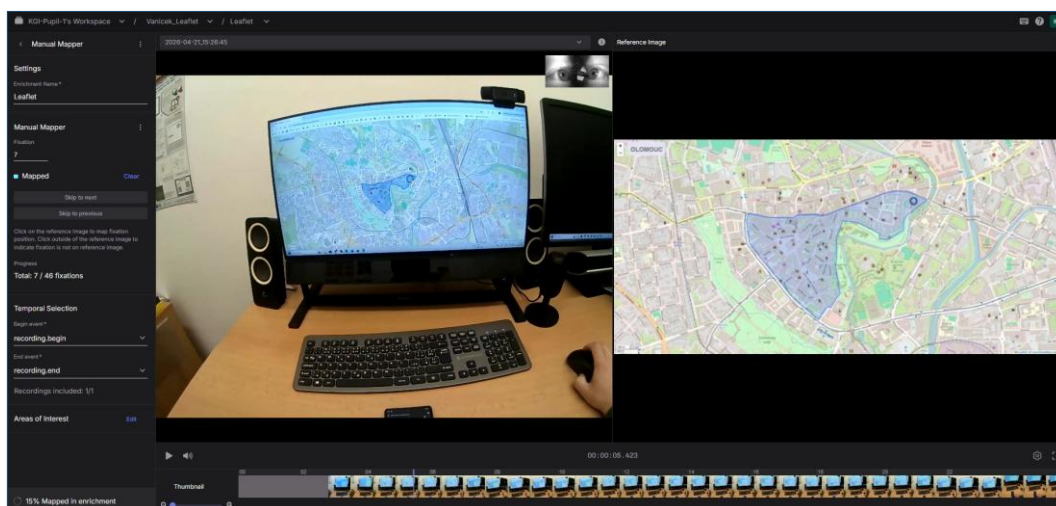
Alternativní přístup založený na markerech pracuje s identifikací referenčních značek v obraze, na jejichž základě je pohled transformován do normalizovaného souřadnicového systému definovaného povrchu. Tento princip je zvláště vhodný pro situace, kdy je analyzován fyzický nebo digitální objekt s proměnlivou perspektivou. Z metodologického hlediska je podstatné, že platforma Pupil Cloud explicitně podporuje workflow pro mapování pohledu na dynamický obsah, včetně webových aplikací, videa či jiných proměnlivých rozhraní. V kontextu interaktivních map to umožňuje převést záznam uživatele pracujícího s mapou (např. na monitoru, tabletu či mobilním zařízení) na referenční obrazovku a analyzovat jej analogicky k experimentům založeným na stacionárním sledování obrazovky. Nad takto definovaným referenčním prostorem lze dále vytvářet oblasti zájmu, generovat heatmapy a extrahovat odpovídající metriky. Současně je však nutné reflektovat omezení tohoto přístupu, kdy úspěšnost mapování je závislá na kvalitě vizuální scény, zejména na dostatečné texturové bohatosti a relativní stabilitě obrazu. Naopak homogenní či opakující se struktury, zakrytí části scény nebo výrazné vizuální změny mohou vést k nepřesnostem v přiřazení bodů pohledu.

¹⁵ **Blickshift GmbH**. Blickshift Analytics. [online]. [cit. 2026-04-22].

Dostupné z: <https://www.blickshift.com/products-services/blickshift-analytics/>

¹⁶ **Pupil Labs**. Pupil Cloud – eye tracking platform for data logistics, visualization, and analysis. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://pupil-labs.com/products/cloud>

¹⁷ **Pupil Labs**. Neon – eye tracking for research and beyond. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://pupil-labs.com/products/neon>



Obrázek 38: Ukázka práce v prostředí Pupil Cloud pro mapování fixací.

Vedle řešení společnosti Pupil Labs existuje alternativa v podobě mobilních eye-tracking brýlí od Tobii, například **Tobii Pro Glasses 3**¹⁸, ke kterým měl autor práce přístup během tohoto disertačního výzkumu. Záznam z těchto zařízení lze přímo analyzovat v prostředí Tobii Pro Lab, kdy je umožněno využít obdobné analytické postupy jako u laboratorních experimentů. Zvláštní význam má v tomto kontextu asistované mapování fixací ze vzniklého videozáznamu na referenční statický obrázek, které umožňuje strukturovat interakci s mapou do analyticky uchopitelných stavů rozhraní.

Z pohledu této disertační práce je tato skupina nástrojů podstatná především v tom, že umožňuje překlenout tradiční napětí mezi laboratorní kontrolou a ekologickou validitou. IKV jsou typicky charakterizovány dynamikou obsahu, změnami měřítka i kontextu použití, což komplikuje přímou aplikaci standardních analytických postupů. Nástroje typu Pupil Cloud tedy nepředstavují pouze doplněk pro mobilní eye-tracking, nýbrž vhodný metodologický prostředek, který umožňuje znovu navázat vztah mezi zaznamenaným pohledem a konkrétní mapovou reprezentací v prostředí, kde se tento vztah v čase proměňuje.

6.2.3 Nástroje pro sekvenční a komparační analýzu

Zatímco běžné proprietární balíky vynikají zejména v exportu klasických metrik pro oblasti zájmu, pro interpretaci časové struktury práce s mapou bývají často vhodnější **specializované vizualizační nástroje**. V tomto směru je mimořádně zajímavý **GazePlotter**¹⁹, otevřená webová aplikace zaměřená na sekvenční vizualizaci eye-tracking dat (Vojtechovska a Popelka, 2026) – **Obrázek 39**. GazePlotter podporuje import z několika různých softwarových prostředí včetně Tobii Pro Lab nebo Pupil Cloud, generuje interaktivní sekvenční grafy, sloupcové přehledy a přechodové matice, umožňuje práci s dynamickými oblastmi zájmu, více časovými režimy a srovnávání participantů, skupin i experimentů. Důležité rovněž je, že jeho validace

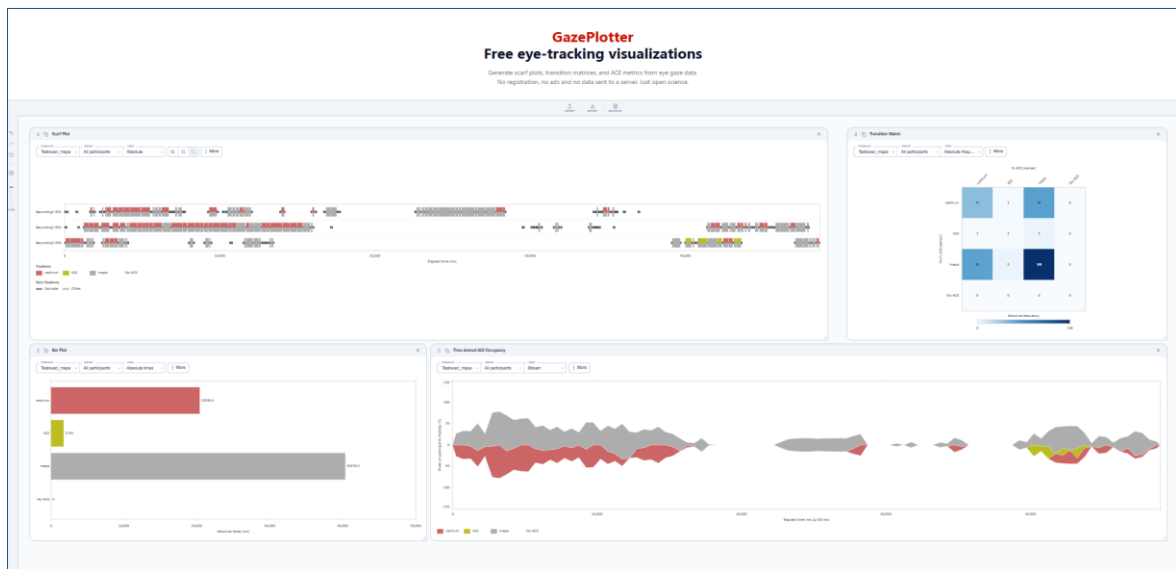
¹⁸ **Tobii**. Tobii Pro Glasses 3 – wearable eye tracker. [online]. [cit. 2026-04-21].

Dostupné z: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3>

¹⁹ **Vojtechovská, Michaela a Popelka, Stanislav**. GazePlotter. [online]. [cit. 2026-04-21].

Dostupné z: <https://gazeplotter.com/>

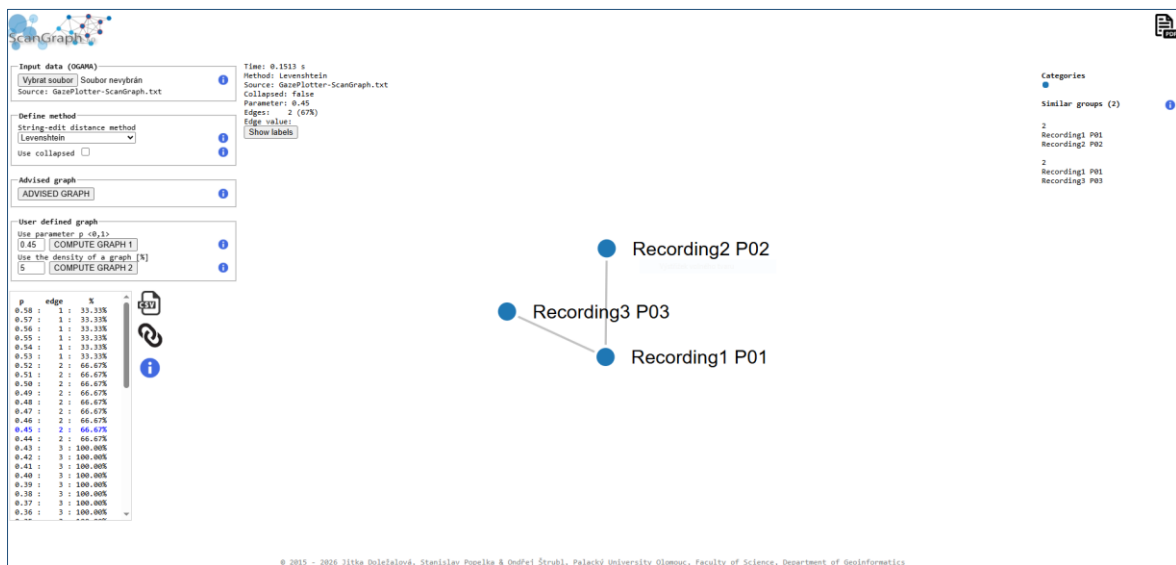
vůči proprietárním výstupům ukázala velmi vysokou shodu v klíčových agregovaných metrikách. Pro výzkum interaktivních map je GazePlotter metodologicky cenný zejména tím, že zpřístupňuje pořadí a rytmus přechodů mezi jednotlivými oblastmi zájmu, tedy například mezi mapovým polem, legendou, panelem vrstev, filtrem a zadáním úlohy. Právě tato časová dimenze bývá při hodnocení použitelnosti zásadní, protože umožňuje odlišit plynulý a předvídatelný postup od chaotického přepínání mezi prvky rozhraní.



Obrázek 39: Náhled na prostředí GazePlotter.

Na GazePlotter přirozeně navazuje **ScanGraph**²⁰, jehož hlavním cílem je porovnání strategií průběhu pohledu mezi uživateli (Doležalová a Popelka, 2016). ScanGraph převádí posloupnosti navštívených oblastí zájmu na textové řetězce, mezi nimiž následně počítá míru podobnosti, a výsledky vizualizuje prostřednictvím shluků v jednoduchém grafovém schématu – **Obrázek 40**. Tento princip je pro kartografii užitečný v tom, že umožňuje identifikovat skupiny participantů se shodnou nebo podobnou strategií čtení mapy, například odlišit expertní a laické přístupy nebo srovnat strategie ve dvou variantách rozhraní. Význam nástroje ScanGraph navíc posiluje skutečnost, že GazePlotter do něj umožňuje přímo exportovat příslušné sekvence, čímž odpadá část dříve nutných převodních kroků.

²⁰ **Doležalová, Jitka a Popelka, Stanislav.** ScanGraph. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://eyetracking.upol.cz/scangraph/>



Obrázek 40: Náhled na prostředí ScanGraph.

Dalším užitečným nástrojem je **OGAMA**²¹, která má v tomto ekosystému spíše historické, avšak stále praktické místo. Jedná se o open-source nástroj pro experimenty založené na posloupnosti obrazových stimulů s podporou map pozornosti, oblastí zájmu, přehrávání záznamu, salience i výpočtu Levenshteinových vzdáleností (Voßkübler a kol., 2008). Vývoj tohoto nástroje však již není aktivně podporován, a proto je dnes vhodnější chápat nástroj OGAMA spíše jako starší, ale stále využitelnou platformu a interoperabilní mezistupeň než jako perspektivní analytické centrum. V kartografickém výzkumu si přesto zachovává určitou hodnotu díky existenci převodníků a návazných nástrojů²² vyvíjených na Katedře geoinformatiky, které umožňují importovat data z různých zařízení do formátu využitelného v historicky zavedených pracovních postupech.

6.2.4 Nástroje pro webcam-based eye-tracking

Specifickou kategorii představují nástroje založené na webové kameře, které významně rozšiřují dostupnost technologie eye-tracking, zároveň však přinášejí odlišná omezení v oblasti přesnosti a kontroly experimentálních podmínek. Mezi dva nejpopulárnější existující nástroje v této kategorii se řadí **WebGazer** a **RealEye**. Oba tyto nástroje autor disertační práce podrobně analyzoval v rámci měsíční **výzkumné stáže** na Univerzitě Salzburg ve spolupráci s Rahimeh Gharibpour a Merve Keskin. Společná studie vyústila v **konferenční příspěvek** na mezinárodní kartografické konferenci ICA v Kanadě (Vaníček a kol., 2025a). Následující text tak představuje zmíněné dva nástroje pro webcam-based eye-tracking včetně stručného popisu výsledků analýzy těchto nástrojů, zejména v souvislosti s IKV.

²¹ **Vosskübler, Adrian.** OGAMA (Open Gaze and Mouse Analyzer). [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <http://www.ogama.net/>

²² **Katedra geoinformatiky,** Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci. Tools. [online]. [cit. 2026-04-21]. Dostupné z: <https://eyetracking.upol.cz/tools/>

  Porovnání nástrojů WebGazer a RealEye bylo autorem představeno v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T.**, Gharipour, R., Keskin, M., Popelka, S. (2025). Exploring the Possibilities and Limitations of Webcam-Based Eye-Tracking for Map Studies: A Comparative Perspective on WebGazer and RealEye. Vancouver, Canada: 32nd International Cartographic Conference (ICC).

WebGazer

WebGazer.js (Papoutsaki a kol., 2016) je otevřená knihovna v jazyce JavaScript, která běží přímo v internetovém prohlížeči, průběžně se kalibruje na základě interakcí uživatele a poskytuje odhady bodu pohledu v reálném čase, aniž by bylo nutné odesílat video na server. Její výhodou je snadná integrace do webového experimentu a plná kontrola nad implementací, což je atraktivní zejména pro výzkumníky, kteří chtějí experiment s mapou navrhnout zcela individuálně. Současně však rozvoj tohoto nástroje již není zaručen²³.

V rámci realizované studie byl WebGazer využit především pro experiment se statickými mapami, přičemž analýza se zaměřovala na klíčové aspekty, jako je přesnost kalibrace, kvalita dat, možnosti exportu surových dat a technické nároky na implementaci experimentu. Výsledky ukázaly, že přibližně 31,43 % participantů dosáhlo požadované úrovně kalibrace ($\geq 80\%$), přičemž i u těchto případů byla často pozorována snížená kvalita dat, pravděpodobně v důsledku pohybu uživatele nebo variability podmínek experimentu (např. osvětlení či kvalita webové kamery).

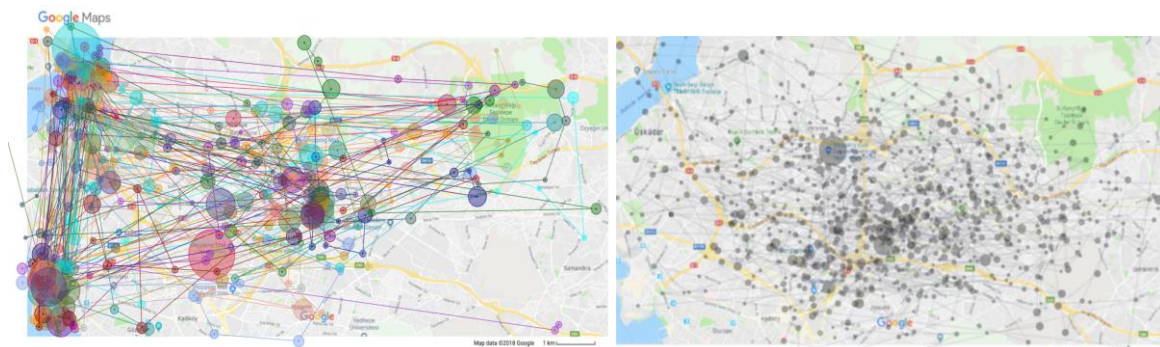
Z metodologického hlediska WebGazer nenabízí vestavěný kalibrační mechanismus, a proto je kvalita výsledků silně závislá na správné implementaci a kontrole experimentálních podmínek. Významnou výhodou je možnost exportu surových dat, která umožňuje jejich detailní post-processing v externích nástrojích (např. R, Python), avšak za cenu vyšších nároků na technické zajištění a zpracování.

Obecně lze nástroje pro webcam-based eye-tracking, včetně nástroje WebGazer, charakterizovat jako **vysoce dostupné a škálovatelné řešení**. Jejich hlavními výhodami jsou **nízké náklady**, "snadná" implementace, možnost zapojení velkého počtu participantů a vysoká ekologická validita, jelikož měření probíhá v přirozeném prostředí uživatelů. To umožňuje realizaci rozsáhlých online studií s velkými datovými soubory. Na druhé straně je však nutné počítat s nižší přesností měření, vyšší variabilitou experimentálních podmínek, závislostí na kvalitě webové kamery a častější potřebou vyřazování participantů z důvodu nedostatečné kvality dat.

Specifickým omezením nástroje WebGazer je relativně **nízká vzorkovací frekvence** (řádově 15–20 Hz), která je výrazně nižší než u laboratorních zařízení (např. 250 Hz), což se projevuje méně přesnými a více rozptýlenými sekvencemi fixací. Přesto je možné z těchto dat identifikovat obecné vzorce vizuálního chování, nikoli však detailní strukturu očních pohybů. Tento rozdíl je patrný i při vizuálním porovnání záznamů z laboratoře a webkamery, kde

²³ **Brown Webgazer Team.** *WebGazer.js: Democratizing Webcam Eye Tracking on the Browser* [software]. Brown University [online]. 2016–2026 [cit. 2026-05-21]. Dostupné z: <https://webgazer.cs.brown.edu/>

laboratorní data vykazují kompaktnější a strukturálně čitelnější průběh fixací a sakád, zatímco data z WebGazer řešení působí více rozptýleně (**Obrázek 41**).



Obrázek 41: Rozdíl v sekvenci fixací mezi stacionárním zařízením v laboratoři (vlevo) a WebGazer řešením (vpravo).

Z hlediska aplikace v kartografickém výzkumu se WebGazer ukazuje jako vhodný nástroj zejména pro identifikaci **obecných trendů** v uživatelském chování na statických mapách. V rámci experimentů bylo například nutné definovat větší oblasti zájmu, aby bylo možné data smysluplně interpretovat. Zároveň bylo zjištěno, že některé základní metriky (např. délka fixací) mohou dosahovat srovnatelných hodnot s laboratorními studiemi, nicméně celková úspěšnost řešení úloh a kvalita dat zůstává nižší.

Celkově lze WebGazer charakterizovat jako flexibilní a metodologicky relevantní nástroj pro pilotní studie, rozsáhlé online experimenty a úlohy založené na hrubší prostorové interpretaci dat. Naopak jeho využití je omezené v případech, kdy je vyžadována vysoká přesnost měření, detailní analýza jemných kartografických prvků nebo přesná rekonstrukce sekvence fixací.

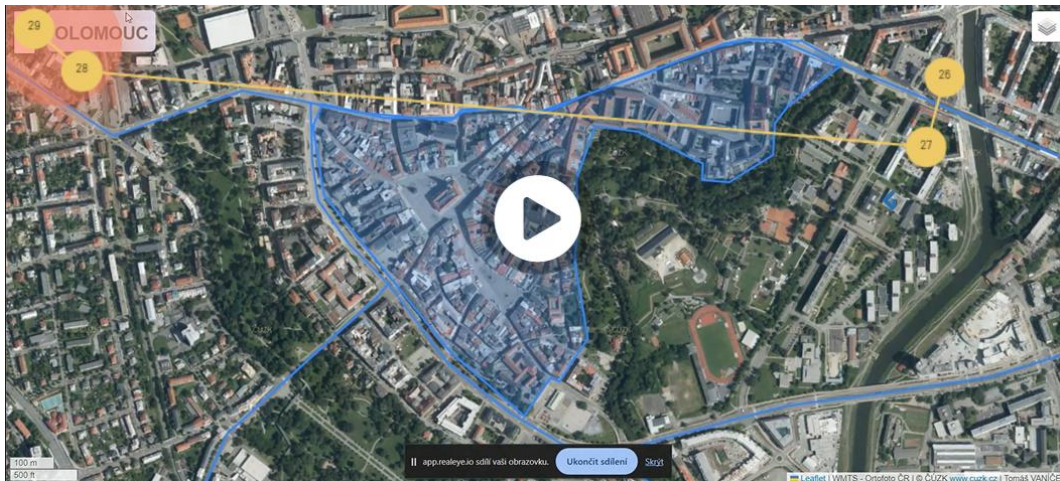
ReaEye

RealEye²⁴ představuje **komerční cloudovou platformu** pro webcam-based eye-tracking, která umožňuje realizaci experimentů bez nutnosti specializovaného hardwaru. Celý systém funguje přímo v internetovém prohlížeči a využívá standardní webové technologie (HTML5, JavaScript) a algoritmy počítačového vidění pro detekci očí a odhad bodu pohledu v reálném čase. Záznam je založen na videu z webové kamery, které je následně zpracováno pomocí modelů strojového učení mapujících pozici očí na souřadnice obrazovky. Zásadní součástí měření je kalibrace, při níž participant sleduje pohybující se bod na obrazovce. Tento proces umožňuje přizpůsobení modelu individuálním charakteristikám uživatele a významně přispívá ke stabilitě a konzistenci dat. Ve srovnání s open-source nástroji (např. WebGazer) tak RealEye vykazuje nižší míru vyřazení participantů, mimo jiné díky mechanismům kontroly kvality, které například pozastaví experiment při výrazném odchýlení hlavy od optimální pozice. Platforma nabízí tři základní typy studií:

- ↳ **Screen Recording,**
- ↳ **Interactive Mockup,**
- ↳ **Embedded Website Study.**

²⁴ **RealEye Sp. z o.o.** RealEye – online research platform with webcam eye-tracking. [online]. [cit. 2026-04-22]. Dostupné z: <https://www.realeye.io>

Z hlediska výzkumu interaktivních map se jako nejvhodnější ukázal typ *Screen Recording*, který umožňuje zaznamenávat obrazovku participantů včetně jejich interakcí (pohyb myši, klikání, scrollování) a současně ukládat eye-tracking data. Tento přístup poskytuje detailní kvalitativní vhled do chování uživatelů, avšak jeho analytické možnosti přímo v prostředí RealEye jsou omezené, zejména u dynamických stimulů, jako jsou webové mapy. Hlavním výstupem je videozáznam kombinující obrazovku, gaze point, scanpath a další prvky (**Obrázek 42**), zatímco automatizované agregované analýzy (např. AOI) zde nelze efektivně využít.



Obrázek 42: Video se sekvencemi fixací jako hlavní výstup ze *Screen Recording* studie.

Naopak typy *Interactive Mockup* a *Embedded Website* umožňují generovat agregované výstupy (např. heatmaps), avšak jejich využitelnost pro interaktivní mapy je **omezená**. Mockup přístup je založen na sekvenci statických obrazů, což neumožňuje realistickou simulaci interaktivního chování mapy (např. návrat zpět, plynulé přiblížení). Přístup *Embedded Website* sice umožňuje práci s reálnou webovou aplikací prostřednictvím SDK, avšak výsledné vizualizace jsou zkreslené vlivem změn rozhraní během interakce (pan, zoom), a systém navíc upozorňuje na nekonzistenci dat způsobenou rozdílným rozlišením obrazovek participantů.

Z hlediska datového výstupu představuje klíčovou funkcionalitu možnost **exportu dat** ve formátu CSV, která zahrnuje široké spektrum informací: surové body pohledu (včetně časových značek), fixace, metriky pro AOI, interakce myši a další doplňkové charakteristiky (např. kvalita záznamu, parametry zařízení). Tyto datové struktury umožňují detailní post-processing mimo platformu, což se v kontextu interaktivních map ukázalo jako nezbytné. Zásadním metodologickým přínosem realizované stáže bylo propojení dat z RealEye s externím, avšak experimentálním, logovacím nástrojem, který zaznamenával veškeré interakce uživatele s mapou (např. posun, přiblížení, otevření pop-up okna). Tato data byla synchronizována na základě časových značek a parametrů obrazovky, čímž vznikl komplexní datový soubor kombinující oční pohyby a uživatelské interakce. Tento přístup se ukázal jako klíčový pro smysluplnou analýzu použitelnosti interaktivních map, neboť samotná platforma RealEye neposkytuje dostatečné nástroje pro interpretaci dynamických stimulů.

Z hlediska přesnosti dosahuje RealEye průměrné chyby lokalizace pohledu přibližně **106 pixelů** na desktopových zařízeních a **56 pixelů** na mobilních zařízeních (**Obrázek 43**). Vzorkovací frekvence se pohybuje přibližně mezi 20–30 Hz, což je výrazně méně než

u laboratorních zařízení (např. 250 Hz), avšak postačuje pro identifikaci obecných vzorců vizuální pozornosti.



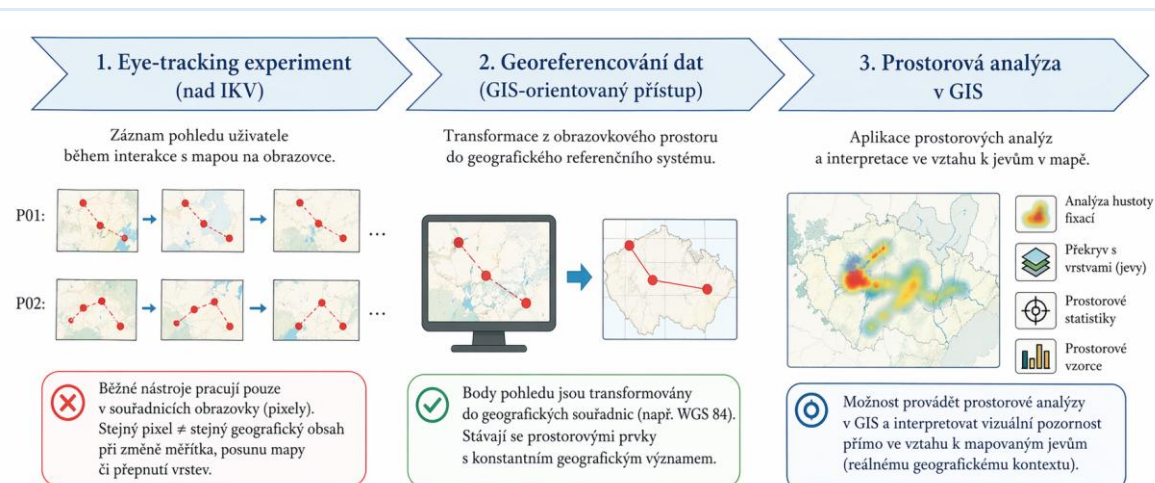
Obrázek 43: Ilustrace přesnosti v prostředí RealEye u interaktivních map.

Z praktického hlediska RealEye nabízí **vysokou škálovatelnost, jednoduché nasazení** a možnost zapojení **velkého množství participantů** v jejich přirozeném prostředí, což zvyšuje ekologickou validitu výzkumu. Současně je však nutné počítat s omezeními typickými pro webcam-based přístup, jako je závislost na kvalitě zařízení, světelných podmínkách, stabilitě připojení a variabilitě prostředí participantů.

Celkově lze RealEye charakterizovat jako efektivní nástroj pro rychlé vzdálené testování použitelnosti, zejména v raných fázích návrhu rozhraní nebo při analýze obecných vzorců chování uživatelů. Pro detailní analýzu interaktivních kartografických vizualizací je však jeho využití omezené a vyžaduje kombinaci s externími nástroji a metodami zpracování dat.

6.2.5 GIS-orientované nástroje

Z hlediska analýzy eye-tracking dat nad IKV představují GIS-orientované nástroje specifickou a metodologicky zásadní kategorii. Jejich význam spočívá v překonání základního omezení většiny běžných nástrojů, které pracují výhradně v souřadnicích obrazovky. V kontextu interaktivních map je tento přístup problematický, neboť změny měřítka, posun mapy či přepínání vrstev vedou k tomu, že stejný pixel na obrazovce neodpovídá konstantnímu geografickému obsahu. Moderní přístupy proto směřují k **transformaci eye-tracking dat z prostoru obrazovky do geografického referenčního systému**, čímž se body pohledu stávají plnohodnotnými prostorovými prvky. Tento posun pak umožňuje aplikovat prostorové analýzy v GIS a interpretovat vizuální pozornost přímo ve vztahu k jevům v mapě (**Obrázek 44**).



Obrázek 44: Princip GIS-orientovaných nástrojů pro analýzu eye-tracking dat.

ET2Spatial

Základním nástrojem v tomto workflow je **ET2Spatial**²⁵ (Sultan a kol., 2022), open-source řešení určené pro georeferencování eye-tracking dat zaznamenaných nad interaktivními webovými mapami. Jeho hlavní funkcí je převod bodů pohledu (RAW) a fixací (FIX) ze souřadnic obrazovky do reálných geografických souřadnic. Tento proces je založen na synchronizaci eye-tracking dat s logy uživatelských interakcí (např. změna středu mapy, zoom), které umožňují rekonstruovat aktuální mapový výřez v čase.

Nástroj pracuje s daty exportovanými z eye-tracking softwaru a současně s logy interakcí (např. MapTrack), které obsahují informace o poloze středu mapy, úrovni přiblížení a časových značkách. Na základě těchto vstupů dochází k výpočtu geografických souřadnic jednotlivých bodů pohledu. Výstupem jsou datové soubory ve **standardních GIS formátech** (GeoJSON, Shapefile, CSV), které umožňují další analýzu v prostředí GIS.

Z metodologického hlediska ET2Spatial zásadně mění jednotku analýzy – místo práce s videozáznamem každého participanta vzniká jednotná prostorová reprezentace, která umožňuje agregaci a srovnání dat napříč účastníky.

ET2GIS

Na nástroj ET2Spatial přímo navazuje **ET2GIS**²⁶ (Šenkeřík, 2023), implementovaný jako *ModelBuilder toolbox* pro ArcGIS Pro. Tento nástroj umožňuje plnohodnotnou GIS analýzu georeferencovaných eye-tracking dat a poskytuje široké spektrum funkcionalit (**Obrázek 45**):

- ↳ **Import a sjednocení dat** (*_Import Data*) – slučování dat od více participantů, sjednocení souřadnicového systému a atributové struktury,
- ↳ **AOI analýza** (*AOI Intersect*) – přiřazení fixací do polygonových oblastí zájmu metodou point-in-polygon,

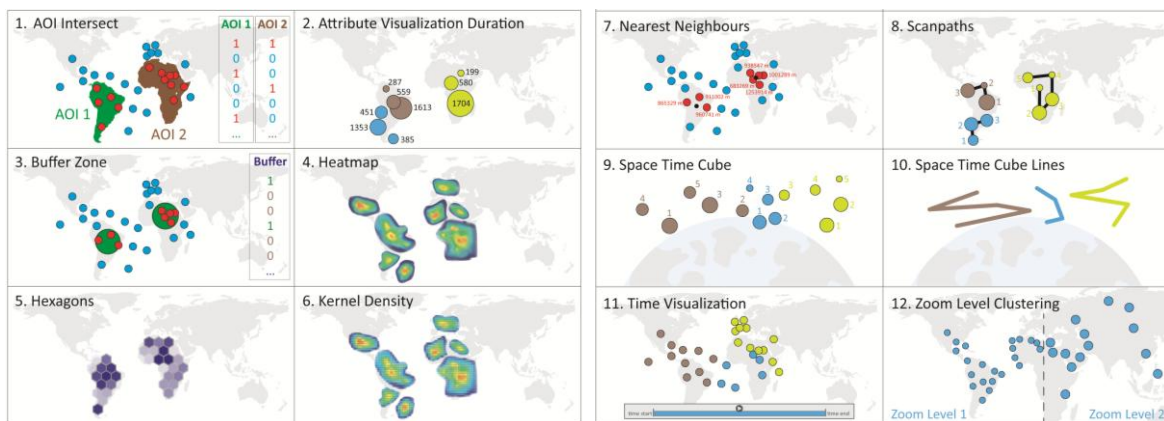
²⁵ Sultan, Minha Noor. *ET2Spatial* [software] [online]. GitHub, bez data [cit. 2026-04-23].

Dostupné z: <https://github.com/minha94/ET2Spatial>

²⁶ Šenkeřík, Jan. *ET2GIS Manual* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2023 [cit. 2026-04-23]. Dostupné z:

https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/senkerik23/docs/ET2GIS_Manual.pdf

- ↳ **Vizualizace dle délky fixací** (*Attribute Visualisation Duration*),
- ↳ **Prostorová blízkost** (*Buffer Zone, Nearest Neighbours*),
- ↳ **„Hustotní“ analýzy** (*Heatmap, Kernel Density, Hexagonal agregace*),
- ↳ **Sekvenční analýza** (*Scanpaths*),
- ↳ **Časoprostorová analýza** (*Space–Time Cube, Space–Time Cube Lines*),
- ↳ **Dynamická vizualizace v čase** (*Time Visualisation*),
- ↳ **Analýza podle úrovně přiblížení** (*Zoom Level Clustering*).



Obrázek 45: Přehled všech dostupných operací nástroje ET2GIS.

ET2GIS tak umožňuje aplikovat standardní geoinformatické operace na eye-tracking data a analyzovat např. koncentraci pozornosti v rámci administrativních jednotek, podél liniových prvků nebo v kontextu tematických vrstev. Významným přínosem je rovněž možnost práce s časovou dimenzí prostřednictvím 3D modelů (*space–time cube*), což běžné eye-tracking nástroje neumožňují.

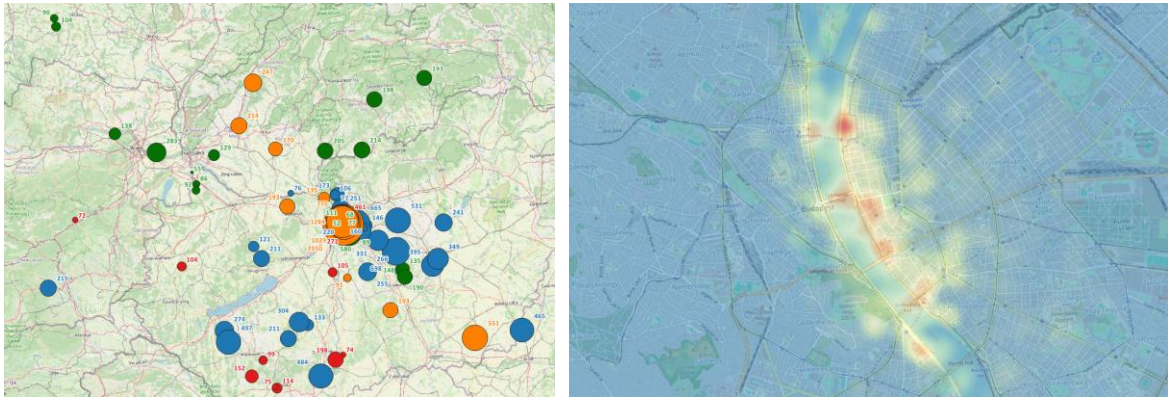
ET2QGIS

Paralelním řešením je **ET2QGIS**²⁷ (Vaníček a kol., 2025b), open-source plugin pro QGIS, jehož tvůrcem je autor této disertační práce. Tento nástroj byl vyvinut s cílem zpřístupnit základní GIS analýzu eye-tracking dat v open-source prostředí a zároveň zjednodušit pracovní workflow. Na rozdíl od ET2GIS se ET2QGIS soustředí na nejčastěji využívané operace, které jsou integrovány do jednoho uživatelského rozhraní:

- ↳ **import a sloučení dat** z ET2Spatial (*Data import*),
- ↳ **přiřazení fixací** do AOI (*AOI Intersect*),
- ↳ **vizualizace podle délky fixací** (*Attribute Visualisation Duration – AVD*),
- ↳ **tvorba heatmap** (*Heatmap*) – **Obrázek 46**,
- ↳ **základní atributové analýzy**.

Hlavní výhodou ET2QGIS je jeho dostupnost, jednoduchost použití a možnost integrace do běžného open-source workflow. Z metodologického hlediska představuje důležitý krok směrem k širší adopci GIS-orientovaného přístupu v analýze eye-tracking dat.

²⁷ **Vaníček, Tomáš.** *ET2QGIS* [software] [online]. GitHub, bez data [cit. 2026-04-23]. Dostupné z: <https://github.com/VanicekTomas/ET2QGIS>



Obrázek 46: Ukázky dvou výstupů z ET2QGIS: operace AVD (vlevo) a Heatmap (vpravo).

Společným jmenovatelem uvedených nástrojů je **transformace eye-tracking dat do podoby geografických prvků**, která umožňuje analyzovat vizuální pozornost ve vztahu k reálným prostorovým jevům. Tento přístup eliminuje problémy spojené s dynamikou interaktivních map a umožňuje odpovídat na otázky, které jsou v pouhém prostoru obrazovky obtížně řešitelné – například zda se pozornost koncentruje v určitých typech území, podél dopravních sítí nebo v konkrétních tematických kategoriích.

★ [Q2] Podrobnější představení těchto přístupů bylo publikováno článku: **Vaníček, T., Šenkeřík, J., & Popelka, S. (2025).** ET2GIS & ET2QGIS tools: Integrating ET2Spatial outputs into GIS for eye movement analysis of web maps. *Earth Science Informatics*, 18, 535. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-02029-y>

👤 Vlastní tvorba těchto nástrojů byla představena autorem v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T. (2023).** Tvorba nástrojů pro analýzu dat z ET2Spatial v prostředí GIS. Plzeň: 25. kartografická konference. In *Sborník abstraktů příspěvků 25. kartografické konference*, 5.–7. září 2023, Plzeň, Česká republika. ISBN 978-80-261-1174-0.

👤 🇧🇪 Princip těchto nástrojů byl představen v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Senkerik, J., **Vaníček, T.**, Beitlová, M. (2023). Visualizing eye movement data of web maps: the ET2Spatial & ET2GIS & ET2QGIS tools. Ghent, Belgium: 18th International Conference on Location Based Services. In *Proceedings of the 18th International Conference on Location Based Services*, s. 199–204.

SGHeatAOI

Specifickým doplňkovým nástrojem je **SGHeatAOI**²⁸ (Koutras a Krassanakis, 2026), který je zaměřen na **automatické vymezení oblastí zájmu** na základě agregovaných dat o pohledu. Princip nástroje spočívá v aplikaci Gaussova filtru na prostorovou distribuci bodů pohledu a následné identifikaci významných oblastí (AOI) prostřednictvím prahování a segmentace heatmapy. Z metodologického hlediska může tento přístup sloužit jako **explorativní nástroj**

²⁸ **Koutras, Efthymis.** SGHeatAOI [software] [online]. GitHub, bez data [cit. 2026-04-23]. Dostupné z: <https://github.com/KoutrasEfthymis/SGHeatAOI>

pro identifikaci potenciálních oblastí zájmu, zejména v situacích, kdy není předem jasné, které části mapy by měly být analyzovány. V kontextu interaktivních map však jeho využití naráží na zásadní omezení – absence časové dimenze a ignorování dynamiky interakce znamená, že výsledné AOI představují pouze agregovaný pohled bez ohledu na kontext uživatelského chování. Z praktického hlediska je však nutné upozornit na výrazná omezení tohoto nástroje. Publikace popisující SGHeatAOI není volně dostupná (není open-access), dokumentace na GitHubu prakticky neexistuje („README“ soubor je prázdný) a samotné uživatelské rozhraní neposkytuje žádné instrukce ani nápovědu. Tohle tedy zásadně komplikuje jeho využití a snižuje jeho praktickou použitelnost. Intuitivnost práce s nástrojem je také velmi nízká a jeho aplikace vyžaduje značnou míru experimentování bez jasného metodického vedení.

6.2.6 Empirická zkušenost s nástroji pro eye-tracking

V rámci této kapitoly byly systematicky testovány vybrané softwarové nástroje pro analýzu očních pohybů, pokrývající různé fáze výzkumného procesu – od návrhu experimentu přes sběr dat až po jejich následnou analýzu a interpretaci. Na základě této zkušenosti bylo provedeno **subjektivní expertní hodnocení autora** disertační práce (**Tabulka 5**). Hodnocení je realizováno na **škále 1–5** (vyšší hodnota = lepší výsledek), přičemž jednotlivé dimenze reflektují jak technické, tak metodologické aspekty práce s nástroji. Poslední sloupec odpovídá váženému souhrnnému indexu, který klade vyšší důraz na klíčové dimenze z hlediska výzkumu použitelnosti IKV – zejména použitelnost, analytické možnosti, efektivitu práce a vhodnost pro kartografii. Naopak nižší váha je přisouzena technickým aspektům a exportním možnostem.

Tabulka 5: Expertní hodnocení autora pro jednotlivé nástroje (škála 1–5)

P = použitelnost; **A** = analytické možnosti; **AOI** = práce s AOI; **DYN** = práce s dynamickými stimuly; **EX** = export a interoperabilita; **T** = technické aspekty; **EF** = efektivita práce; **KART** = vhodnost pro kartografický výzkum; **INDX** = souhrnný vážený index.

Nástroj	P	A	AOI	DYN	EX	T	EF	KART	INDX
 Tobii Pro Lab	4	4	5	4	5	3	4	5	4,2
 Gazepoint Analysis	2	2	2	1	4	4	1	2	2,1
 BiSigma Software Suite	1	4	3	2	3	5	3	2	2,7
 Blickshift Analytics	2	4	3	2	3	4	2	2	2,6
 Pupil Cloud	4	4	4	5	4	2	4	5	4,2
 GazePlotter	5	4	-	-	5	5	5	5	4,8
 ScanGraph	4	3	-	-	1	4	4	4	3,5
 OGAMA	2	3	2	2	3	3	3	3	2,7
 WebGazer	2	1	1	2	3	3	1	4	2,1
 RealEye	4	3	3	3	3	2	3	3	3,2
 ET2Spatial	2	1	-	5	5	3	2	5	3,0
 ET2GIS	4	5	3	4	5	3	4	5	4,3
 ET2QGIS	4	3	3	4	5	3	4	5	4,0
 SGHeatAOI	1	2	3	1	1	3	1	4	2,0

Z celkového pohledu je zřejmé, že hodnocené **nástroje se výrazně liší** podle své primární funkce a nelze je chápat jako vzájemně plně zaměnitelné, protože jednotlivé kategorie nástrojů pokrývají odlišné části analytického workflow.

Komplexní platformy (Tobii Pro Lab, Gazepoint Analysis, BiSigma, Blickshift Analytics) vykazují největší variabilitu. Tobii Pro Lab dosahuje stabilně vysokého hodnocení napříč většinou kategorií, zejména v oblasti práce s AOI, exportu a celkové vhodnosti pro kartografický výzkum. Jeho slabinou zůstává vyšší technická náročnost a závislost na ekosystému výrobce. Naopak Gazepoint Analysis dosahuje celkově nízkého hodnocení, především kvůli omezené použitelnosti, nízké efektivitě práce a slabé podpoře dynamických stimulů. BiSigma a Blickshift Analytics nabízejí relativně silné analytické možnosti, avšak jejich nízká použitelnost a vyšší nároky na uživatele snižují jejich praktickou využitelnost.

Mobilní eye-tracking (Pupil Cloud) vykazuje vyvážené a nadprůměrné hodnocení, zejména v oblasti práce s dynamickými stimuly, AOI a kartografické relevance. Jeho hlavní přínos spočívá ve schopnosti mapování pohledu v reálném prostředí, a to jej činí vhodným pro studie mimo laboratorní podmínky.

Nástroje pro sekvenční a komparační analýzu (GazePlotter, ScanGraph, OGAMA) se ukazují jako velmi silné v interpretaci časové struktury vizuálního chování. GazePlotter dosahuje vůbec nejvyššího hodnocení v oblasti použitelnosti, efektivitě i kartografické relevance, což potvrzuje jeho vhodnost jako doplňkového analytického nástroje. ScanGraph nabízí solidní možnosti komparace sekvencí fixací, avšak trpí omezenou interoperabilitou. OGAMA představuje spíše univerzální, avšak méně specializované řešení.

Nástroje pro webcam-based eye-tracking (WebGazer, RealEye) vykazují typický kompromis mezi dostupností a přesností. WebGazer je hodnocen nízko z hlediska analytických možností a efektivitě práce, zejména z důvodu nutnosti programátorských znalostí, avšak jeho kartografická relevance není zanedbatelná, zejména pro pilotní studie. RealEye dosahuje vyváženějšího hodnocení díky lepší použitelnosti a stabilitě, avšak jeho analytické možnosti zůstávají omezené, zejména u dynamických stimulů.

GIS-orientované nástroje představují z hlediska této disertační práce důležitou kategorii. ET2Spatial sice vykazuje nižší použitelnost a omezené analytické možnosti jako samostatný nástroj, avšak exceluje v práci s dynamickými stimuly a interoperabilitě, což odpovídá jeho roli transformačního nástroje. ET2GIS a ET2QGIS dosahují vysokého celkového hodnocení, zejména díky své schopnosti integrovat eye-tracking data do GIS a umožnit jejich plnohodnotnou prostorovou analýzu. ET2QGIS navíc představuje dostupné open-source řešení, které rozšiřuje využitelnost tohoto přístupu. Naopak SGHeatAOI, přestože je metodologicky zajímavý, dosahuje nízkého hodnocení v oblasti použitelnosti a efektivitě práce, což reflektuje problematickou uživatelskou zkušenost a absenci dokumentace.

Z provedeného hodnocení vyplývá, že pro analýzu eye-tracking dat v kontextu interaktivních map **neexistuje jediný univerzální nástroj**, který by pokrýval všechny fáze výzkumného procesu. Jednotlivé nástroje se specializují na dílčí aspekty – od řízeného experimentu, přes sekvenční analýzu až po prostorovou interpretaci dat.

Komplexní platformy poskytují stabilní základ pro sběr a základní analýzu dat, sekvenční nástroje umožňují hlubší interpretaci vizuálních strategií a GIS-orientované nástroje přinášejí zásadní metodologický posun směrem k prostorové analýze. Nástroje pro webcam-based eye-tracking pak rozšiřují možnosti sběru dat do vzdáleného a škálovatelného prostředí.

Pro potřeby této disertační práce se proto jako nejvhodnější ukazuje **kombinovaný přístup**, který využívá silné stránky jednotlivých nástrojů. V laboratorních studiích plní klíčovou roli Tobii Pro Lab, který je vhodné doplnit o GazePlotter (případně ScanGraph) pro detailní analýzu sekvencí. Pro interpretaci dat ve vztahu ke geografickému obsahu interaktivních map se pak nabízí nástroje ET2Spatial a ET2QGIS (resp. ET2GIS). Nástroje pro webcam-based eye-tracking mají své místo zejména v pilotním výzkumu a při práci s rozsáhlejšími vzorky. Takto koncipovaný analytický přístup lépe odpovídá komplexní povaze IKV než snaha podřídít celý výzkumný proces jednomu univerzálnímu nástroji.

6.3 Verbalizační metody

Verbalizační metody jsou významným doplňkem metod založených na sledování pohybu očí, neboť umožňují interpretovat kognitivní procesy, které samotná eye-tracking data nedokáží přímo postihnout. Zatímco eye-tracking poskytuje informace o tom, kam se uživatel dívá, verbální protokoly přinášejí odpověď na otázku, proč tak činí. V kontextu hodnocení použitelnosti IKV je tato kombinace důležitá, protože interaktivní mapy vyžadují nejen percepci, ale i interpretaci. Jak ukazují současné výzkumy, samotná data o fixacích nemusí postačovat k vysvětlení chybného porozumění nebo nevyužití interaktivních prvků, a proto je vhodné je doplnit o verbální výpovědi participantů. Verbalizační metody vycházejí z přístupu tzv. protokolové analýzy (*protocol analysis*), která předpokládá, že část kognitivních procesů může být zpřístupněna prostřednictvím verbalizace obsahu pracovní paměti (Ericsson, 2006). V oblasti výzkumu použitelnosti a HCI se nejčastěji uplatňují dvě základní varianty, a to **think-aloud** a **talk-aloud**, které se liší především mírou spontaneity a hloubkou verbalizace.

6.3.1 Think-aloud metoda

Metoda **think-aloud** (přemýšlení nahlas) je kognitivní technika zaměřená na získání detailního vhledu do myšlenkových procesů jedince během řešení úlohy. Participant je instruován, aby průběžně a bez filtru verbalizoval vše, co ho během plnění úkolu napadá. Tímto způsobem jsou zachycovány nejen racionální úvahy, ale i nejistoty, hypotézy, chyby v interpretaci či emocionální reakce (např. zmatení, frustrace nebo naopak jistota a porozumění) (Bláha, 2015). Zjednodušený princip zobrazuje **Obrázek 47**.



Obrázek 47: Simplifikovaný princip metody think-aloud (zdroj: Vaníček (2022)).

V kontextu kartografického výzkumu umožňuje think-aloud **odhalit nedostatky** v návrhu mapového rozhraní, zejména v oblastech s nízkou srozumitelností, nedostatečnou vizuální hierarchií nebo problematickou interaktivitou. Participant může například explicitně formulovat, že nerozumí významu legendy, neidentifikuje interaktivní prvek nebo si není jistý interpretací barevného kódování.

Získaná data jsou zpravidla zaznamenávána ve **formě audiozáznamu** a následně analyzována několika způsoby. Nejčastější je kvalitativní analýza založená na **segmentaci výpovědí** a jejich **kódování** podle předem definovaného schématu (Vaníček a Popelka, 2023). Alternativně lze provést **transkripci** a následnou **lingvistickou analýzu**, případně využít **expertní interpretaci**, která kombinuje verbální data s dalšími zdroji (např. eye-tracking, interakční logy). Protože se autor této disertační práce věnoval podrobně metodě think-aloud v jeho diplomové práci (Vaníček, 2022), je zde cíleně uvedena jako metoda vhodná pro hodnocení IKV. Zároveň byla metoda think-aloud v kartografickém výzkumu opakovaně využita a prokázala svou přínosnost při identifikaci problémů použitelnosti. Byla aplikována například při hodnocení *flow maps* (Amorim a Pugliesi, 2021), meteorologických webových map (Hujňáková, 2018), interaktivních map kriminality (Roth a kol., 2015b) anebo pro další interaktivní vizualizace v jiných odvětvích (Koenig a kol., 2011). Ve všech případech přispěla k odhalení problémů, které by nebylo možné identifikovat pouze pomocí kvantitativních dat.

Nevýhodou metody think-aloud je však její relativní náročnost pro participanty i výzkumníky. Verbalizace může narušovat přirozený průběh úlohy, zvyšovat kognitivní zátěž a ovlivňovat chování uživatele. Z tohoto důvodu není vždy vhodná pro všechny typy experimentů, zejména pro časově omezené nebo komplexní úlohy.

★ [Q2] K metodě think-aloud byl publikován článek: **Vaníček, T., Popelka, S. (2023)** The think-aloud method for evaluating the usability of a regional atlas, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(3), <https://doi.org/10.3390/ijgi12030095>

👤 Praktičnost think-aloud metody byla autorem představena v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T. (2024)**. Využití metody think-aloud pro hodnocení použitelnosti atlasu Moravskoslezského kraje. Ústí nad Labem: Výroční konference ČGS 2024. In *Sborník abstraktů Výroční konference ČGS v Ústí nad Labem 2.–5. 9. 2024*, UJEP Ústí nad Labem, s. 13.

👤 Využití metody think-aloud bylo autorem představeno v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T. (2023)**. The use of the think-aloud method for the evaluation of the atlas. Olomouc: Symposium ICA Spring Olomouc 2023 – Atlases: their design and use. In *Abstracts of the Symposium ICA Spring Olomouc 2023*, April 3–5, 2023, Olomouc, Czechia. ISBN 978-80-11-02999-9.

👤 Využití metody think-aloud bylo také autorem představeno v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T. (2023)**. Využití metody think-aloud v kartografickém výzkumu. České Budějovice: XXII. česko-slovenská konference Kvalitativní přístup a metody ve vědách o člověku – Punk v kvalitativním výzkumu aneb „Kvalita is not dead“. In *Sborník abstraktů XXII. česko-slovenské konference Kvalitativní přístup a metody ve vědách o člověku, 2023*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta. ISBN 978-80-7394-985-3.

👤 Využití metody think-aloud bylo také autorem představeno v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T. (2022)**. Využití metody think-aloud pro hodnocení regionálního atlasu.

Plzeň: ISAF & Geomatics in Projects & Plan4all Joint Conference 2022. In *Sborník abstraktů příspěvků ISAF & Geomatics in Projects & Plan4all Joint Conference 2022*. Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-261-1049-1.

6.3.2 Talk-aloud metoda

Metoda **talk-aloud** (někdy označovaná obecněji jako *concurrent verbalisation*) představuje **méně invazivní alternativu** k think-aloud metodě. Participant je rovněž vyzván k verbální aktivitě, avšak není požadováno, aby verbalizoval veškeré své myšlenky. Výpovědi jsou selektivnější a často reflektují spíše **výsledky kognitivních procesů** než jejich průběh. Typicky se jedná například o **vyslovení odpovědi na úlohu**, komentář k provedené akci nebo stručné vyjádření nejistoty. Data tak mohou sloužit často primárně k zachycení odpovědí participantů a k poskytnutí kontextu k jejich chování, nikoli k detailní rekonstrukci jejich myšlenkových procesů. Záznamy pak nebývají systematicky transkribovány ani kódovány, ale jsou spíše využity jako podpůrný zdroj pro interpretaci eye-tracking dat a identifikaci kritických momentů interakce. Výhodou talk-aloud je jeho **nižší náročnost** a **menší interference** s přirozeným chováním uživatele. Participant není nucen kontinuálně verbalizovat, což umožňuje zachovat plynulejší průběh interakce s mapou. Zároveň však tento přístup poskytuje méně detailní informace o kognitivních procesech a jeho analytický potenciál je omezenější než u think-aloud metody.

Hlavní rozdíl mezi oběma metodami tak spočívá v hloubce a charakteru verbalizace. Think-aloud usiluje o zachycení průběžného myšlení, zatímco talk-aloud se zaměřuje spíše na jeho výstupy. Z metodologického hlediska lze think-aloud považovat za nástroj vhodný pro detailní kognitivní analýzu, zatímco talk-aloud představuje pragmatičtější řešení pro studie, kde je kladen důraz na přirozenost chování a efektivitu sběru dat. Jak ukazují empirické zkušenosti, samotná vizuální pozornost ne vždy koreluje s porozuměním – uživatel může fixovat určitý prvek, aniž by správně interpretoval jeho význam. Verbalizace v takových případech umožňuje identifikovat příčiny chyb, například nepochopení legendy, přehlédnutí interaktivního prvku nebo nesprávnou interpretaci dat. Pro potřeby této práce by byla **preferována spíše metoda talk-aloud**, která umožňuje zachytit klíčové momenty interakce bez výrazného narušení experimentální situace. Metoda think-aloud je vnímána jako metodologicky hodnotná, avšak její využití je vhodné spíše v situacích, kde je cílem detailní analýza kognitivních procesů, nikoli primárně hodnocení efektivity a použitelnosti interaktivního rozhraní. Celkově tak lze konstatovat, že kombinace metody eye-tracking a verbalizačních metod představuje robustní přístup k hodnocení IKV, který umožňuje propojit kvantitativní analýzu vizuální pozornosti s kvalitativním porozuměním uživatelskému chování.

6.4 Metriky použitelnosti (efektivnost, účinnost, spokojenost)

Metriky použitelnosti jsou **základním nástrojem** pro systematické hodnocení interaktivních systémů, včetně IKV. Vycházejí z obecně přijímané definice použitelnosti dle normy **ISO 9241-11**, která ji chápe jako míru, do jaké mohou specifikovaní uživatelé dosahovat stanovených cílů s **účinností** (*effectiveness*), **efektivností** (*efficiency*) a **spokojeností** (*satisfaction*) v daném kontextu použití (ISO, 2018). Tyto tři dimenze tvoří základní rámec pro návrh i vyhodnocení uživatelských studií.

Výsledky systematického mapování studií (DC1) potvrzují, že metriky použitelnosti jsou v současném výzkumu interaktivních vizualizací **běžně využívány**, avšak s **nerovnoměrným zastoupením** jednotlivých dimenzí. Nejčastěji byla sledována efektivnost, typicky operacionalizovaná jako čas potřebný k dokončení úkolu (34 studií). Následovala účinnost, hodnocená prostřednictvím ukazatelů jako úspěšnost řešení, chybovost či subjektivně vnímaná obtížnost (24 studií). Naproti tomu dimenze spokojenosti byla zastoupena pouze ve 23 studiích, přičemž její metodologická implementace vykazovala výrazné nedostatky.

Efektivnost

Efektivnost vyjadřuje, s jakými nároky na **čas a úsilí** je uživatel schopen dosáhnout stanoveného cíle. V kontextu interaktivních map je nejčastěji měřena prostřednictvím času potřebného k dokončení úkolu (*time-on-task*). Tento ukazatel umožňuje identifikovat problematické části rozhraní, které zpomalují uživatelskou interakci, například neintuitivní ovládací prvky, složitou navigaci nebo nízkou srozumitelnost vizualizace. Časová efektivnost je často interpretována v kombinaci s dalšími metrikami, zejména účinností, protože samotná rychlost dokončení úkolu nemusí nutně znamenat správné porozumění. V některých případech totiž může být rychlé vyřešení jen výsledkem povrchní interakce nebo náhodného odhadu.

Účinnost

Účinnost reflektuje míru, do jaké uživatel dosahuje **správného výsledku**. V praxi je operacionalizována především pomocí **úspěšnosti řešení úloh**, případně doplněné o **chybovost** nebo **indikátory obtížnosti**. V kartografickém výzkumu může účinnost odhalit například problémy s interpretací legendy, nesprávné čtení tematických map nebo nepochopení interaktivních funkcí. Účinnost je zásadní metrikou zejména v situacích, kdy je cílem ověřit, zda uživatel správně porozuměl prezentovaným datům. V kombinaci s metodou eye-tracking umožňuje lokalizovat konkrétní prvky rozhraní, které vedou k chybám, a tím poskytuje silný diagnostický nástroj pro návrh zlepšení.

Spokojenost

Třetí dimenzí použitelnosti je spokojenost, která odráží **subjektivní vnímání systému** uživatelem. Na rozdíl od předchozích metrik ji nelze přímo odvodit z pozorovaného chování, a proto je nutné ji zjišťovat **prostřednictvím dotazníků**. Výsledky DC1 zjistily, že právě tato dimenze je v praxi často podhodnocována nebo metodologicky zjednodušována. Přestože byla spokojenost sledována ve 23 studiích, standardizované nástroje byly využívány pouze omezeně. Konkrétně byl identifikován výskyt dotazníků SUS (*System Usability Scale*) ve čtyřech případech, NASA-TLX (*NASA Task Load Index*) rovněž ve čtyřech případech, UEQ (*User Experience Questionnaire*) ve třech případech a MSQ (*Minnesota Satisfaction Questionnaire*) pouze v jednom případě. Tento stav lze považovat za problematický, protože nestandardizované nebo *ad hoc* vytvořené dotazníky často neumožňují spolehlivé srovnání

výsledků napříč studiemi ani jejich validní interpretaci. Standardizované dotazníky přitom **poskytují ověřené škály**, které umožňují kvantifikovat subjektivní zkušenost uživatele a porovnávat ji s referenčními hodnotami.

- ↳ **SUS** představuje jednoduchý a rychlý nástroj pro celkové hodnocení použitelnosti, vhodný i pro menší studie.
- ↳ **NASA-TLX** se zaměřuje na subjektivní kognitivní zátěž a umožňuje detailnější analýzu náročnosti úkolů.
- ↳ **UEQ** nabízí komplexní vhled do uživatelské zkušenosti skrze hodnocení jejich pragmatických a hedonických aspektů.
- ↳ **MSQ** se orientuje na celkovou spokojenost uživatele se systémem.

Z metodologického hlediska je proto vhodné standardizované dotazníky **systematicky zařazovat** do výzkumného designu, ideálně v kombinaci s objektivními metrikami efektivnosti a účinnosti. Z výše uvedeného vyplývá, že jednotlivé metriky použitelnosti poskytují pouze dílčí pohled na interakci uživatele se systémem. Teprve jejich kombinace umožňuje komplexní hodnocení použitelnosti. V kontextu této disertační práce je proto kladen důraz na integraci těchto tří dimenzí, doplněnou o metodu eye-tracking a další kvalitativní metody. Takto koncipovaný přístup pak umožňuje nejen identifikovat problémy použitelnosti, ale také porozumět jejich příčinám a formulovat relevantní návrhy pro zlepšení IKV.

6.5 Logování uživatelských interakcí

Logování uživatelských interakcí představuje v kontextu hodnocení použitelnosti IKV poměrně **zásadní metodologickou komponentu**, která významně rozšiřuje interpretační potenciál samotných eye-tracking dat. Zatímco eye-tracking umožňuje zachytit, kam se uživatel dívá, neposkytuje plnohodnotný kontext jeho činnosti, tedy *co uživatel v daném okamžiku dělá a proč k dané vizuální fixaci dochází*. Právě tento kontext je možné doplnit prostřednictvím záznamu interakcí, jako jsou **kliknutí, pohyby myši, scrollování** nebo další akce v uživatelském rozhraní (Ahrens, 2020).

Eye-tracking data jsou typicky reprezentována souřadnicemi bodu pohledu (*point of regard*) opatřenými časovou značkou, případně agregovanými do fixací a sakád. Tyto údaje však samy o sobě neobsahují informaci o změnách rozhraní, například o přiblížení mapy, jejím posunu nebo aktivaci konkrétní vrstvy. V případě interaktivních map je tento nedostatek zásadní, neboť stejná pozice na obrazovce může v různých časových okamžicích reprezentovat odlišný geografický obsah. Kombinace dat očních pohybů s logováním interakcí tak umožňuje mapovat pohled uživatele na konkrétní prvky rozhraní či geografické objekty v jejich aktuálním kontextu (Ahrens, 2020).

Z metodologického hlediska je logování interakcí navíc neinvazivní a lze jej realizovat **prostřednictvím běžných vstupních zařízení**, jako jsou myš nebo touchpad. Zaznamenané události lze strukturovat například na klikací (*click-related*), pohybové (*movement-related*) a další typy interakcí, přičemž tyto charakteristiky mohou být využity i samostatně, například pro detekci emočních stavů uživatele (Yang a Qin, 2021). V kombinaci s eye-tracking daty pak vzniká komplexní datová základna umožňující detailní analýzu uživatelského chování. Výzkumy zároveň ukazují, že mezi pohybem myši a pohledem existuje určitá korelace, což umožňuje identifikovat různé vzorce chování uživatelů (Aviz a kol., 2019).

Specifický význam logování interakcí vyniká zejména v případě interaktivních map. Tyto systémy jsou charakteristické dynamickou změnou obsahu v čase, vyvolanou akcemi uživatele. Tento fakt zásadně komplikuje interpretaci eye-tracking dat, protože fixace zaznamenaná na konkrétní pozici obrazovky nemusí odpovídat stejnému geografickému objektu v čase.

Jak ukazuje studie [Ooms a kol. \(2015\)](#), **kombinace eye-tracking dat s logováním uživatelských akcí** umožňuje řešit tento problém prostřednictvím referencování souřadnic obrazovky na geografický prostor. Díky tomu lze přesně určit, na jaký geografický objekt se uživatel díval v konkrétním okamžiku, a to i v případě dynamicky se měnícího mapového obsahu. Obdobný mechanismus řeší i nástroj ET2Spatial (viz podkapitola 6.2.5). Autoři zároveň zdůrazňují, že bez integrace těchto dvou datových zdrojů je analýza interaktivních vizualizací výrazně omezená a často vyžaduje časově náročné manuální zpracování.

Logování interakcí tak představuje klíčový krok směrem k **vyšší ekologické validitě** experimentů, protože umožňuje analyzovat chování uživatelů v podmínkách blízkých reálnému používání aplikací. Současně však přináší nové výzvy, zejména v oblasti synchronizace dat, jejich objemu a analýzy. V reakci na uvedené metodologické potřeby vznikla řada nástrojů, které kombinují eye-tracking s logováním uživatelských interakcí.

Jedním z významných přístupů je framework **FeatEyeTrack** ([Göbel a kol., 2019](#)), který umožňuje **automatické přiřazení pohledu uživatele** ke konkrétním kartografickým prvkům během interakce s mapou. Klíčovou inovací tohoto řešení je propojení bodů pohledu s vektorovým modelem aktuální mapové vizualizace, čímž odpadá nutnost manuální anotace oblastí zájmu. Tento přístup umožňuje detailní analýzu na úrovni jednotlivých prvků mapy, včetně jejich atributů a vizuálních charakteristik, a současně zaznamenává i uživatelské vstupy (např. pohyby myši), čímž poskytuje komplexní obraz interakce uživatele s mapou.

Dalším relevantním nástrojem je **3DgazeR** ([Herman a kol., 2017](#)), který rozšiřuje princip logování a analýzy interakcí do oblasti **3D geovizualizací**. Tento nástroj umožňuje převod 2D souřadnic pohledu na prostorové (X, Y, Z) souřadnice v rámci 3D scény na základě znalosti parametrů virtuální kamery. Tím se výrazně zjednodušuje analýza vizuální pozornosti v interaktivních 3D prostředích, která by jinak vyžadovala časově náročnou analýzu videozáznamů po jednotlivých snímcích.

V prostředí webových map byl již dříve navržen nástroj **MapTrack** ([Růžička, 2012](#)), jehož cílem je zaznamenávat interakce uživatelů s mapou a vytvářet jejich uživatelské profily. Tento systém umožňuje sledovat například posloupnost kroků uživatele, úrovně přiblížení nebo kliknutí na mapové prvky, přičemž data jsou ukládána a dále analyzována prostřednictvím webového rozhraní. Význam tohoto přístupu spočívá především v možnosti studovat reálné chování uživatelů ve webových mapových aplikacích a identifikovat vzorce jejich interakce. Rozšířením tohoto původního nástroje MapTrack následně vnikl nástroj **MishPink** využitý v PS4 (více je o něm popsáno v příslušné kapitole PS4).

Z širšího hlediska existují také komerční nástroje pro logování uživatelských interakcí, jako jsou **MouseFlow**²⁹, **HotJar**³⁰ nebo **Crazy Egg**³¹, které jsou běžně využívány v oblasti webové analytiky (Aviz a kol., 2019). Tyto nástroje sice neposkytují přímou integraci s eye-tracking daty, avšak ilustrují obecný význam logování interakcí pro analýzu uživatelského chování.

Z výše uvedeného je zřejmé, že logování uživatelských interakcí **představuje nezbytný doplněk** eye-tracking výzkumu, zejména v kontextu IKV. Bez těchto dat není možné spolehlivě interpretovat vizuální pozornost uživatele ve vztahu k dynamicky se měnícímu obsahu mapy.

Pro potřeby této disertační práce je proto logování interakcí chápáno jako integrální součást metodologického rámce. Umožňuje propojit pohled uživatele s konkrétními akcemi a stavem rozhraní, čímž vzniká komplexní obraz jeho chování. V kombinaci s nástroji pro georeferencování eye-tracking dat a s dalšími analytickými přístupy tak tvoří základ pro hlubší porozumění procesům, které stojí za používáním interaktivních map.

6.6 Fyziologické a biometrické metody

Vedle metod založených na analýze očních pohybů a uživatelských interakcí představují doplňkovou kategorii nástrojů pro hodnocení použitelnosti a uživatelské zkušenosti také fyziologické a biometrické metody identifikované v DC1. Tyto přístupy umožňují zachytit vnitřní stavy uživatele, které nejsou přímo pozorovatelné prostřednictvím chování na úrovni rozhraní, a poskytují tak hlubší vhled do kognitivních a emočních procesů probíhajících během interakce s vizuálním stimulem. V rámci systematického mapování studií (DC1) byly identifikovány zejména metody založené na měření mozkové aktivity, fyziologických reakcí organismu a pohybové aktivity uživatele. Mezi nejčastěji využívané patří elektroencefalografie (EEG), galvanická reakce kůže (GSR), funkční blízká infračervená spektroskopie (fNIRS), systémy pro snímání pohybu (MoCap) a další doplňkové metody, jako jsou elektrokardiografie (ECG, česky EKG) či elektromyografie (EMG). Z obecného hlediska tyto metody umožňují kvantifikovat fyziologické reakce uživatele, které souvisejí s jeho kognitivní zátěží, mírou pozornosti, stresem nebo emoční odezvou. Měření těchto charakteristik je v oblasti výzkumu použitelnosti vhodné zejména proto, že uživatelé nejsou vždy schopni své vnitřní stavy explicitně verbalizovat nebo je přesně reflektovat v dotaznících. Kombinace behaviorálních a fyziologických dat tak přispěje k robustnější interpretaci výsledků (Tikadar a Bhattacharya, 2021). Přestože fyziologické a biometrické metody poskytují cenné informace o vnitřních stavech uživatele, jejich implementace je spojena s řadou omezení. Mezi hlavní patří vyšší technická a finanční náročnost, složitost sběru a interpretace dat a často i nižší ekologická validita experimentů. Z tohoto důvodu jsou tyto metody vnímány v disertační práci pouze jako možné doplňkové a nepříliš podstatné nástroje k hodnocení použitelnosti, a proto nejsou dále v PS využívány.

²⁹ **Mouseflow**. *Mouseflow: Behavior analytics for optimal website UX* [online]. [cit. 2026-04-27].

Dostupné z: <https://mouseflow.com/>

³⁰ **Hotjar**. *Hotjar: Website heatmaps & behaviour analytics tools* [online]. [cit. 2026-04-27].

Dostupné z: <https://www.hotjar.com/>

³¹ **Crazy Egg**. *Crazy Egg: Website optimization, heatmaps, recordings and analytics tools* [online]. [cit. 2026-04-27]. Dostupné z: <https://www.crazyegg.com/>

6.7 Další existující doplňkové metody

Vedle výše uvedených metod existuje celá řada dalších přístupů, které mohou přispět k hodnocení použitelnosti IKV. Tyto metody často pocházejí z oblasti *user experience* (UX), kognitivní psychologie či informační vědy a doplňují eye-tracking přístup o další relevantní data. Typickými představiteli metod využitelnými v kartografickém kontextu jsou dotazníky, rozhovory či specifické testovací platformy.

Doplňkové dotazníky

Dotazníky představují jeden z **nejčastěji využívaných nástrojů** pro sběr dat v oblasti hodnocení použitelnosti. Jejich hlavní výhodou je jednoduchost, nízká časová i finanční náročnost a možnost získání dat od většího počtu respondentů. V kontextu interaktivních map umožňují zachytit **subjektivní názory** uživatelů na použitelnost, přehlednost rozhraní, srozumitelnost mapového obsahu či celkovou uživatelskou zkušenost. Dotazníky poskytují prostor pro vyjádření postojů, preferencí a zkušeností, které nelze přímo odvodit z behaviorálních dat. Uživatelé mohou identifikovat konkrétní problémy, na které během interakce narazili, a současně formulovat návrhy na zlepšení. Získaná data lze následně analyzovat kvantitativně pomocí statistických metod, čímž je umožněno srovnávání dat mezi skupinami uživatelů nebo variantami rozhraní. Jak bylo identifikováno v rámci DC1, dotazníky představují prakticky **standardní součást studií** zaměřených na použitelnost map. Jejich největší přínos spočívá v kombinaci s dalšími metodami, kdy doplňují objektivní data o subjektivní interpretaci uživatele.

Doplňkové rozhovory

Rozhovory, zejména ve formě polostrukturovaných či následných (*post-test*) interview, představují nástroj pro hlubší interpretaci výsledků experimentu. Na rozdíl od dotazníků umožňují flexibilní práci s odpověďmi respondentů a dávají výzkumníkovi možnost reagovat na konkrétní situace zaznamenané během testování. V kontextu interaktivních map jsou rozhovory významné pro vysvětlení specifických momentů uživatelského chování, například nečekaných navigačních strategií, chybné interpretace mapových prvků nebo problémů s pochopením legendy či interakčních prvků. Mohou také odhalit širší kontext užívání map, například zkušenosti uživatele s podobnými nástroji nebo jeho očekávání vůči mapovým aplikacím. Rozhovory tak představují most mezi kvantitativními daty a jejich kvalitativní interpretací. Rozhovory jsou také obecně užitečné pro odhalování názorů samotných tvůrců map a bariér v procesu tvorby IKV (Zbiejczuk Suchá a kol., 2026).

★ [Q2] Rozhovory pro odhalení bariér při tvorbě IKV byly využity v publikovaném článku: Zbiejczuk Suchá, L., Popelka, S., Šašínková, A., Godišková, G., Beitlová, M., **Vaníček, T.**, Stachoň, Z., & Šašínk, Č. (2026). The map maker's dilemma: Design challenges in interactive mapping for social science and data journalism. *Information Discovery and Delivery*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/IDD-11-2024-0184>

👤 Praktičnost rozhovorů pro zjištění pohledů tvůrců interaktivních map byly představeny v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Zbiejczuk Suchá, L., Šašínková, A., Godišková, G., Beitlová, M., **Vaníček, T.**, Stachoň, Z., Šašínk, Č. (2024). Za hranicemi interaktivních map: pohledy tvůrců na komunikaci socio-demografických dat. Ústí nad Labem: Výroční konference

ČGS 2024. In *Sborník abstraktů Výroční konference ČGS v Ústí nad Labem, 2.–5. 9. 2024*, UJEP Ústí nad Labem, s. 14.

👤 Bariéry zjištěné prostřednictvím rozhovorů byly představeny v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Zbiejczuk Suchá, L., Šasinková, A., Šasinka, Č., Beitlová, M., **Vaníček, T.** (2023). Překonávání bariér v komunikaci prostorových informací: poznatky z projektu GAČR. Olomouc: 12. Olomoucká podzimní sociologická konference.

Další metody a nástroje

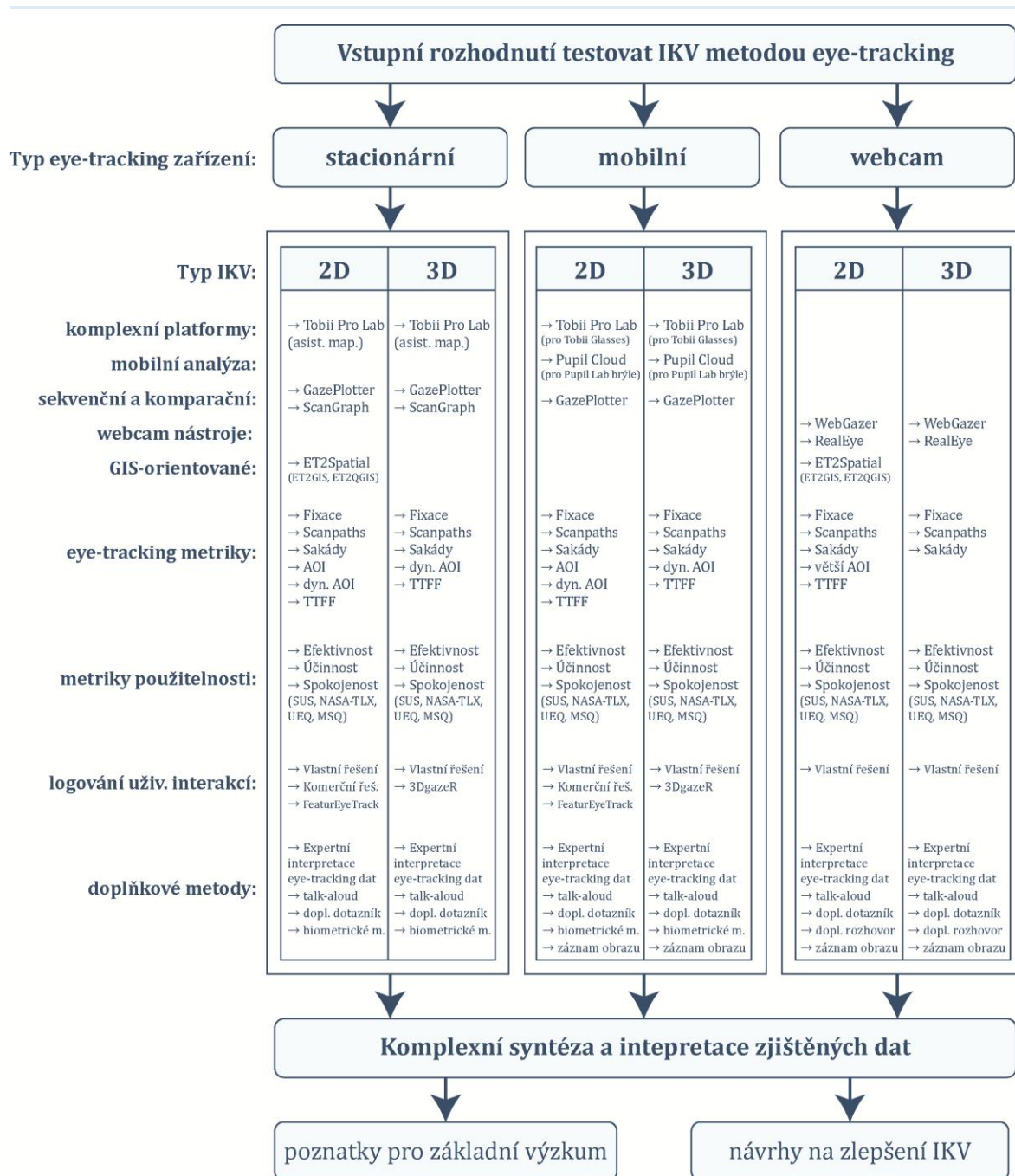
Spektrum metod využitelných pro hodnocení použitelnosti interaktivních map je podstatně širší a zahrnuje dále například **skupinové diskuse** (focus groups), **třídění karet** (card sorting), **heuristické hodnocení**, **A/B testování**, **expertní posudky** nebo metody založené na **sledování chování uživatelů** v reálném provozu. V kontextu kartografického výzkumu je vhodné zmínit také specializovanou experimentální platformu **Hypothesis** (Šasinka a kol., 2017). Tento software umožňuje realizaci komplexních experimentů, včetně tvorby úloh, řízení průběhu experimentu a interakce mezi více participanty v reálném čase. Významnou výhodou platformy je možnost integrace metody eye-tracking, kdy toto řešení tak umožňuje kombinovat behaviorální a interakční data s eye-tracking daty v rámci jednoho prostředí.

6.8 Závěrečný výběr a syntéza metod

V předchozích podkapitolách byla představena **široká škála metod a nástrojů** využitelných pro hodnocení použitelnosti IKV. Jak však vyplývá z provedené analýzy, **neexistuje jediný univerzální přístup** ani software, který by byl schopen komplexně pokrýt celý výzkumný proces. Identifikované metody zahrnují jak samotné **metriky metody eye-tracking** (fixace, sakády, sekvence fixací, AOI analýzu, TTFF), tak **expertní interpretaci eye-tracking záznamů**, široké spektrum **analytických nástrojů** (např. Tobii Pro Lab, Gazepoint Analysis, BiSigma, Blickshift Analytics, Pupil Cloud, GazePlotter, ScanGraph, OGAMA, WebGazer, RealEye), **GIS-orientovaná řešení** (ET2Spatial, ET2GIS, ET2QGIS, SGHeatAOI) a rovněž doplňkové metody, jako jsou **verbalizační techniky** (think-aloud, talk-aloud), výpočet **metrik použitelnosti** (efektivnost, účinnost, spokojenost), **standardizované dotazníky** (SUS, NASA-TLX, UEQ, MSQ), **logování uživatelských interakcí** (např. FeaturEyeTrack, 3DgazeR), **fyzilogické a biometrické metody** (EEG, GSR aj.) či další přístupy (dotazníky, rozhovory). Takto široké spektrum přístupů však není prakticky aplikovatelné v plném rozsahu v rámci jedné studie. Pro potřeby navazujícího dílčího cíle DC3 bylo proto nezbytné provést jejich **výběr a syntézu** tak, aby vznikl metodologicky konzistentní, ale zároveň prakticky realizovatelný rámec. Tento výběr byl proveden na základě poznatků z DC1 (systematické mapování studií), empirických zkušeností autora s jednotlivými nástroji (DC2) a specifických požadavků výzkumu zaměřeného na interaktivní mapy.

Pro zřehlednění tohoto výběru a jeho metodologického ukotvení bylo sestaveno komplexní **metodologické schéma (Obrázek 48)**. Toto schéma představuje **syntézu dosavadních poznatků** a současně slouží jako rámec pro návrh experimentů v oblasti hodnocení použitelnosti IKV. Jeho hlavním cílem je umožnit systematické rozhodování o vhodné kombinaci metod v závislosti na dvou klíčových faktorech, tedy na typu použitého eye-tracking zařízení (stacionární, mobilní, webcam-based) a typu interaktivní kartografické vizualizace (2D a 3D IKV). Vizualizace ve virtuální realitě (VR) a další méně zastoupené typy IKV nejsou

v tomto schématu explicitně zahrnutý, a to z důvodu jejich nižšího zastoupení v analyzovaných studiích (DC1) i omezené empirické opory v rámci této práce.



Obrázek 48: Metodologické schéma vybraných metod a nástrojů.

Struktura metodologického schématu vychází z hierarchického uspořádání rozhodovacích kroků. V jeho horní části je definováno vstupní rozhodnutí realizovat hodnocení IKV metodou eye-tracking. Následně dochází k rozdělení **podle typu eye-tracking zařízení** na tři základní větve: **stacionární**, **mobilní** a **webcam-based přístup**. Každá z těchto větví je dále členěna podle typu IKV (2D a 3D), čímž vzniká šest základních experimentálních scénářů.

V rámci každého scénáře jsou systematicky uspořádány jednotlivé vrstvy metod a nástrojů. **První vrstva** zahrnuje vhodné softwarové nástroje a analytické platformy. Pro stacionární eye-tracking se jedná zejména o nástroje jako Tobii Pro Lab (umožňující asistované mapování fixací), GazePlotter a ScanGraph, doplněné o GIS-orientované nástroje (ET2Spatial, ET2GIS, ET2QGIS). V případě mobilního eye-tracking přístupu dominuje kombinace Tobii Pro Lab (pro brýle Tobii Pro Glasses) a Pupil Cloud. Webcam-based přístup je reprezentován nástroji WebGazer a RealEye, přičemž jejich využití je omezeno především na makroúroveň analýzy.

Druhou vrstvu tvoří samotné metriky metody eye-tracking, které představují základní analytický aparát. Jedná se o fixace, sakády, sekvence fixací (scanpaths), analýzu oblastí zájmu (AOI), včetně dynamických AOI, a metriky typu TTFF. Výběr konkrétních metrik se přitom liší v závislosti na typu zařízení a IKV, přičemž například u webcam-based přístupů je nutné pracovat s většími oblastmi zájmu z důvodu nižší přesnosti dat.

Třetí vrstvu představují metriky použitelnosti, konkrétně efektivnost, účinnost a spokojenost. Zvláštní důraz je kladen na využití standardizovaných dotazníků (např. UEQ), které byly v rámci DC1 identifikovány jako nedostatečně využívané, přestože představují klíčový nástroj pro objektivizaci subjektivního hodnocení.

Čtvrtou vrstvu tvoří logování uživatelských interakcí, které umožňuje doplnit eye-tracking data o kontext konkrétních akcí uživatele (např. kliknutí, zoomování, posuny mapy). Pro tyto účely jsou využitelné jak vlastní řešení, tak specializované nástroje (např. FeaturEyeTrack, 3DgazeR).

Pátou vrstvu představují doplňkové metody, zejména verbalizační techniky (talk-aloud), expertní interpretace dat, doplňkové dotazníky, rozhovory a v případě potřeby i biometrické metody. Tyto přístupy umožňují interpretovat kvantitativní data v širším kognitivním a behaviorálním kontextu.

Ve spodní části schématu dochází k integraci všech těchto vrstev v rámci komplexní syntézy a interpretace zjištěných dat. Výstupem tohoto procesu jsou jak poznatky přispívající k základnímu výzkumu, tak i konkrétní návrhy na zlepšení interaktivních kartografických vizualizací.

Na základě tohoto schématu byl proveden **finální výběr metod** pro navazující dílčí cíl DC3. Jako klíčové byly identifikovány **metody kombinovatelné s metodou eye-tracking**, zejména **logování uživatelských interakcí, verbalizační metody** (především talk-aloud) a **výpočet metrik použitelnosti**. V oblasti spokojenosti je explicitně akcentováno využití **standardizovaných dotazníků** (např. UEQ). Z hlediska analytických nástrojů se jako nejvhodnější ukázala kombinace **Tobii Pro Lab** (pro řízení experimentu a základní analýzu) s nástroji typu **GazePlotter** pro detailní sekvenční analýzu.

Tato kapitola tak uzavírá dílčí cíl DC2 a současně představuje **metodologický most** mezi syntézou poznatků z literatury (DC1) a jejich empirickým ověřením v rámci pěti případových studií (DC3). Navržené metodologické schéma bude v těchto studiích aplikováno a následně aktualizováno na základě empiricky zjištěných přístupů. Tato aktualizace bude představovat jeden z hlavních metodologických přínosů disertační práce, zejména v oblasti analýzy eye-tracking dat nad interaktivními kartografickými vizualizacemi.

DC3

7 SADA PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ (DC3)

Tato kapitola představuje **empirickou část disertační práce** a naplňuje třetí dílčí cíl (DC3), jehož hlavním účelem je ověřit navržený metodologický rámec v reálných podmínkách výzkumu IKV. Zatímco DC1 bylo zaměřeno na systematické mapování existujících přístupů a DC2 na jejich výběr, syntézu a metodologické ukotvení, DC3 představuje jejich praktickou aplikaci prostřednictvím sady případových studií. Cílem této kapitoly není pouze aplikovat jednotlivé metody izolovaně, ale především ověřit jejich kombinovatelnost, přínos a limity v různých typech kartografických stimulů. Důraz je kladen zejména na metodu eye-tracking a její propojení s dalšími přístupy, jako je logování uživatelských interakcí, verbalizační metody či metriky použitelnosti. Případové studie tak slouží jako prostředek k hlubšímu porozumění tomu, jaké metodologické postupy jsou vhodné pro analýzu dynamických a interaktivních mapových rozhraní.

Soubor pěti případových studií byl navržen tak, aby pokrýval různé typy IKV a současně postupně zvyšoval metodologickou i analytickou náročnost. Jednotlivé studie na sebe navazují a reflektují postupný vývoj metodologického přístupu autora, od jednodušších scénářů až po komplexní experimentální design. První případová studie **(PS1)** „Interaktivní mapy v datové žurnalistice“ se zaměřuje na relativně jednoduché formy interaktivních map, které jsou často využívány v mediálním prostředí. Tyto mapy představují základní typ stimulů, u nichž lze relativně přímočaře aplikovat eye-tracking metody a vyhodnocovat základní metriky použitelnosti. Druhá případová studie **(PS2)** „Proměny Olomouce v čase“ představuje komplexnější interaktivní aplikaci, která umožňuje porovnávání map. V této studii se již výrazněji projevují metodologické výzvy spojené s dynamikou rozhraní. Analýza eye-tracking dat je zde doplněna o kvalitativní přístup, logování uživatelských interakcí a hodnocení uživatelské zkušenosti pomocí dotazníku UEQ. Třetí případová studie **(PS3)** „Interaktivní atlas a jeho statická varianta“ je zaměřena primárně na metodologické aspekty analýzy eye-tracking dat v prostředí dynamických kartografických stimulů. Hlavním cílem není hodnocení použitelnosti konkrétního produktu, ale návrh a ověření analytických postupů pro práci s daty získanými při interakci s proměnlivým obsahem. Čtvrtá případová studie **(PS4)** „Uživatelské interakce na stolním a mobilním zařízení“ se soustředí především na logování uživatelských interakcí jakožto doplňkového zdroje dat k eye-tracking metodě. Těžiště této studie spočívá spíše v metodologickém výzkumu než v samotném hodnocení použitelnosti konkrétní aplikace. Cílem je ověřit potenciál interakčních logů pro interpretaci uživatelského chování a jejich integraci s eye-tracking daty. Závěrečná pátá případová studie **(PS5)** „3D-Geo-Vis“ představuje vyvrcholení celé empirické části práce. V této studii jsou systematicky aplikovány a kombinovány metodologické přístupy ověřené v předchozích studiích. Jedná se o komplexní experimentální design zahrnující eye-tracking, logování uživatelských interakcí (MapLogger), standardizovaný dotazník UEQ a doplňkové subjektivní hodnocení.

Celkově tato kapitola představuje klíčový krok od teoreticko-metodologické roviny k empirickému ověření. Výsledky jednotlivých případových studií budou sloužit nejen k **hodnocení konkrétních kartografických aplikací**, ale především k validaci a dalšímu **zpřesnění metodologického schématu** navrženého v DC2.

PS1

7.1 Interaktivní mapy v datové žurnalistice (PS1)

Hodnocený produkt	interaktivní vizualizace v pěti článcích
Základní metody	eye-tracking (fixace, sekvence fixací, AOI, vlastní interpretace dat), talk-aloud , výpočet metrik použitelnosti
Použité zařízení	Tobii Pro Spectrum (stacionární)
Hlavní nástroje	Tobii Pro Lab, GazePlotter
Počet úloh	8 (+ 2× explorativní)
Počet participantů	44 (z toho 22 expertů, 22 laiků)

Tato případová studie (PS1) vycházela z bakalářské práce Košťála (2025), která byla zpracována **pod vedením autora** této disertační práce a byla zaměřena na **formativní analýzu interaktivních map v prostředí datové žurnalistiky**. Empirická část výzkumu, zejména sběr dat a prvotní analýzy včetně výpočtu metrik použitelnosti, byla realizována studentem (dále uváděn také jako *moderátor*). Metodologický rámec studie, včetně návrhu experimentu, struktury úloh a způsobu vyhodnocení, byl však koncipován autorem disertační práce. Pro účely této práce byla výstupní data dále zpřesněna a rozšířena, zejména v oblasti definice a interpretace AOI, a některé výsledky byly lépe či nově interpretovány s důrazem na metodologickou konzistenci a jejich využitelnost v širším kontextu výzkumu použitelnosti IKV. Z metodologického hlediska představuje tato studie **základní typ experimentu** zaměřeného na hodnocení použitelnosti IKV. Oproti komplexnějším případovým studiím (PS2–PS5) se zde pracuje s relativně jednoduššími stimuly – interaktivní mapy jsou zasazeny do struktury webového článku a jejich interaktivita je omezená na základní operace (např. filtrování, změna vrstvy, odečet hodnot). Tato skutečnost činí PS1 metodologicky důležitou vtom, že umožňuje analyzovat chování uživatelů v relativně kontrolovaném prostředí bez výrazných komplikací spojených s dynamikou mapového obsahu (např. změna měřítka či posun mapy).

Zároveň se jedná o **specifický kontext datové žurnalistiky**, kde mapová vizualizace není primárním rozhraním, ale je součástí širšího narativního prostředí. Uživatel tak musí alokovat svou pozornost mezi text, grafiku a interaktivní prvky, kdy tato skutečnost může ovlivňovat jeho interakční strategii i schopnost efektivně využít mapu.

★ [D] Tato PS1 byla publikována v článku (nyní také odesláno k indexaci na WoS): **Vaníček, T., Košťál, J., & Popelka, S. (2026). Evaluating the usability of interactive news maps using eye-tracking. *Hradec Economic Days*, 16(1), 309–320.**

<https://doi.org/10.36689/uhk/hed/2026-01-027>

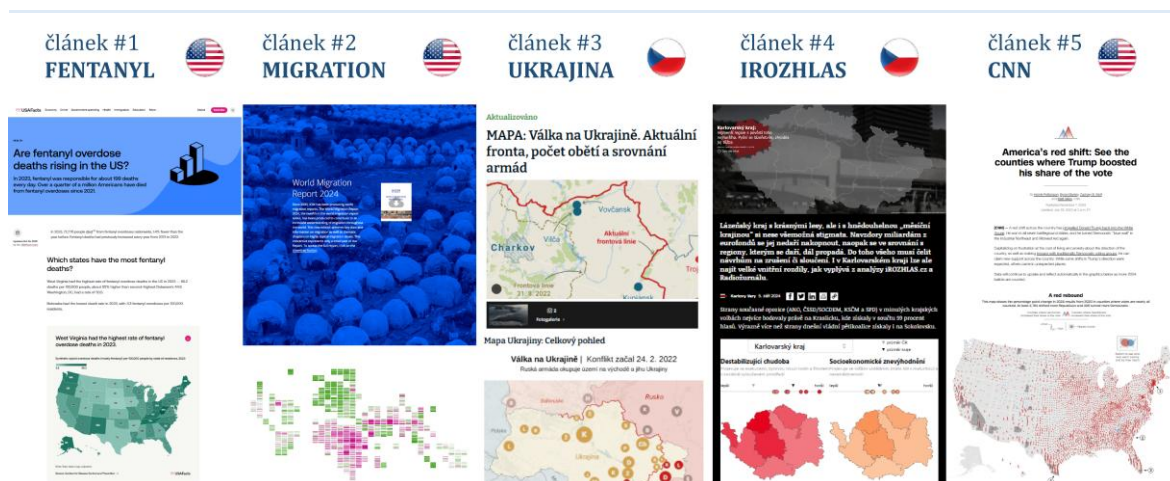
👤 Tato PS1 byla autorem představena v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T., Košťál, J., & Popelka, S. (2026). Evaluating the usability of interactive news maps using eye-tracking: 24th Hradec Economic Days. In *Proceedings of the international scientific conference Hradec Economic Days 2026*, s. 309–320. ISBN 978-80-7435-966-8.**

7.1.1 Hodnocený produkt (PS1)

Hodnoceným produktem v rámci této případové studie byly **interaktivní mapové vizualizace** zasazené do prostředí **online článků datové žurnalistiky**. Na rozdíl od tradičních kartografických aplikací zde mapy nepředstavují samostatné analytické rozhraní, ale jsou integrovány do komplexního narativního prostředí, které kombinuje text, statické grafiky, multimédia a další interaktivní prvky. Tento kontext je z hlediska hodnocení použitelnosti podstatný, neb ovlivňuje jak alokaci vizuální pozornosti, tak způsob interakce uživatele s mapou. Výběr stimulů probíhal ve vícefázovém procesu, který zahrnoval:

- ↳ rešerši dostupných datové žurnalistických článků obsahujících mapové vizualizace,
- ↳ předvýběr kandidátních článků na základě jejich relevance a interaktivity,
- ↳ pilotní testování (n = 3) sloužící k ověření srozumitelnosti úloh a technické funkčnosti,
- ↳ finální selekci pěti článků reprezentujících různé přístupy k integraci map do článku.

Výsledný soubor stimulů tvořilo **pět článků** (FENTANYL³², MIGRATION³³, UKRAJINA³⁴, IROZHLAS³⁵, CNN³⁶) (**Obrázek 49**), přičemž každý z nich obsahoval jednu či více interaktivních mapových vizualizací. Tyto články byly publikovány na reálných zpravodajských platformách a zachovávaly si svůj původní design, včetně všech kontextových prvků (např. navigace, reklamy, cookies lišty). Tento přístup byl zvolen záměrně s cílem maximalizovat ekologickou validitu experimentu.



Obrázek 49: Náhled na výběr pěti žurnalistických článků pro hodnocení.

³² **USAFacts.** *Are fentanyl overdose deaths rising in the US?* Online. In: USAFacts. Dostupné z: <https://usafacts.org/articles/are-fentanyl-overdose-deaths-rising-in-the-us/>. [cit. 2026-04-30].

³³ **International Organization For Migration.** *World Migration Report 2024 – interactive platform.* Online. Dostupné z: <https://worldmigrationreport.iom.int/msite/wmr-2024-interactive/>. [cit. 2026-04-30].

³⁴ **E15.** *Válka na Ukrajině: mapa bojů, fronta aktuálně a počet obětí.* Online. Dostupné z: <https://www.e15.cz/ukrajina-valka-mapa-migrace-armada>. [cit. 2026-04-30].

³⁵ **Grim, Jakub; Boček, Jan; Kočí, Petr.** *Karlovarský kraj: nejmenší region s pověstí toho nejhoršího. Pyšní se lázeňstvím, zhyzdila jej těžba.* Online. In: **iROZHLAS.cz.** 5. září 2024. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/karlovarsky-kraj-nejmensi-region-s-povesti-nejhorsiho-pysni-se-lazenstvim_2409050500_jgr. [cit. 2026-04-30].

³⁶ **CNN.** *How the vote shifted in the 2024 election.* Online. Dostupné z: <https://edition.cnn.com/interactive/2024/11/politics/vote-shift-trump-election-dg/>. [cit. 2026-04-30].

Z kartografického hlediska se jednalo především o mapy využívající **metodu kartogramu** (např. volební výsledky, socioekonomické indikátory) a dále využívající **bodové znaky** (např. distribuce jevů v prostoru). Všechny mapy obsahovaly **interaktivními prvky** (např. tooltipy, filtry, přepínání vrstev). Interaktivita byla však ve všech případech relativně omezená a odpovídala běžné praxi datové žurnalistiky. Nejčastěji se jednalo o najetí myši (hover) pro zobrazení hodnot, kliknutí pro zobrazení detailu, jednoduché filtrování nebo změnu zobrazení. Naopak pokročilé kartografické operace, jako je změna měřítka (zoom) nebo posun mapy (pan), byly přítomny pouze omezeně nebo vůbec. Tato vlastnost však byla z metodologického hlediska klíčová, neboť výrazně redukovala problém variability stimulů mezi participanty, který je typický pro plně interaktivní mapové aplikace.

Zásadním aspektem hodnoceného produktu je způsob, jakým je mapa integrována do struktury článku. Ve všech případech byla mapa vložena jako **součást lineárního „scrollovacího“ rozhraní**, obklopena textovým obsahem a často doplněna dalšími vizuálními prvky (grafy, obrázky). Toto rozpoložení tak vytváří konkurenční prostředí pro vizuální pozornost uživatele. Eye-tracking analýza proto nehodnotí pouze samotnou mapu, ale i její relativní pozici a schopnost „upoutat“ uživatele v rámci celého rozhraní.

Z metodologického hlediska tak PS1 **představuje přechod** mezi hodnocením čistě statických vizualizací a plně interaktivních mapových aplikací. Mapy jsou sice interaktivní, ale jejich chování je relativně stabilní, a proto je možné využít tradiční analytické přístupy, jako je AOI analýza nad screenshoty. Produkt hodnocený v rámci PS1 tak lze charakterizovat jako interaktivní mapové vizualizace s nízkou až střední mírou interaktivity, zasazené do komplexního prostředí datové žurnalistických článků. Klíčovým rysem těchto stimulů není pouze samotná mapa, ale především její kontext – tedy způsob, jakým je prezentována a jak konkuruje ostatním prvkům stránky. Tento aspekt tedy činí PS1 metodologicky významnou tak, že umožňuje studovat použitelnost interaktivních map v realistickém prostředí každodenního užívání.

★ [D] Konkrétní tematické politické mapy byly podobně hodnoceny v článku: Popelka, S., Dorušáková, J., **Vaníček, T.**, & Vojtěchovská, M. (2025). Mapping democracy: An eye-tracking analysis of election maps. *Proceedings of the 2025 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. <https://doi.org/10.1145/3715669.3725865>

7.1.2 Zadání úloh a průběh experimentu (PS1)

Zadání úloh v rámci této případové studie vycházelo z principů formativní analýzy použitelnosti, kdy jsou úlohy konstruovány tak, aby respondent při jejich řešení musel aktivně využít konkrétní prvky rozhraní, v tomto případě interaktivní mapové vizualizace. Úlohy byly formulovány jako explicitní otázky, které operacionalizují konkrétní informační potřeby a zároveň umožňují jednoznačné vyhodnocení správnosti odpovědi. Celkem bylo definováno **osm úloh (Q1–Q8)**, které byly rozděleny mezi pět hodnocených článků, přičemž u dvou z nich byla navíc zařazena fáze volného procházení (VP), jejímž cílem bylo zachytit přirozené chování uživatele bez explicitního zadání (**Tabulka 6**). Tato část byla z metodologického hlediska významná, neboť umožnila analyzovat spontánní alokaci vizuální pozornosti a míru přirozené interakce s mapovými prvky v prostředí datové žurnalistického článku.

Tabulka 6: Přehled úloh PS1 pro participanty (pořadí článků bylo randomizováno)

ID úlohy	Označení článku	Zadání úlohy	Správná odpověď	Časový limit
Q1	FENTANYL	Který stát v USA má druhou nejnížší úmrtnost na fentanyl na 100 000 obyvatel?	Hawaii	120 s
Q2	FENTANYL	Jaký byl podíl fentanylu na příčině úmrtí předávkování opiody v roce 2018?	67 %	120 s
VP1	MIGRATION	<i>Volné procházení článku.</i>	-	240 s
Q3	MIGRATION	Jaké procento migrantů se nachází v České populaci?	5 % a 5,1 %	120 s
VP2	UKRAJINA	<i>Volné procházení článku.</i>	-	180 s
Q4	UKRAJINA	Kolik obyvatel mělo město Doněck před invazí v roce 2021?	905 364	120 s
Q5	IROZHLAS	Jaký byl procentuální rozdíl volebních hlasů mezi nejúspěšnějším a nejméně úspěšným regionem v Karlovarském kraji pro pětikoalici?	25,3 %	120 s
Q6	IROZHLAS	Které čtyři regiony dosahují nejvyšších hodnot (nejhorších) indexu destabilizující chudoby v Karlovarském kraji?	Aš, Kraslice, Sokolov, Ostrov	120 s
Q7	CNN	Jaká je změna zisku procentních bodů republikánské strany v Miami-Dade na Floridě v prezidentských volbách 2024 oproti roku 2020?	18,8 bodů	120 s
Q8	CNN	Jaká strana a o kolik hlasů vyhrála v prezidentských volbách v Los Angeles County (Kalifornie na západním pobřeží) v roce 2024?	Demokraté, o 1 226 204 hlasů	120 s

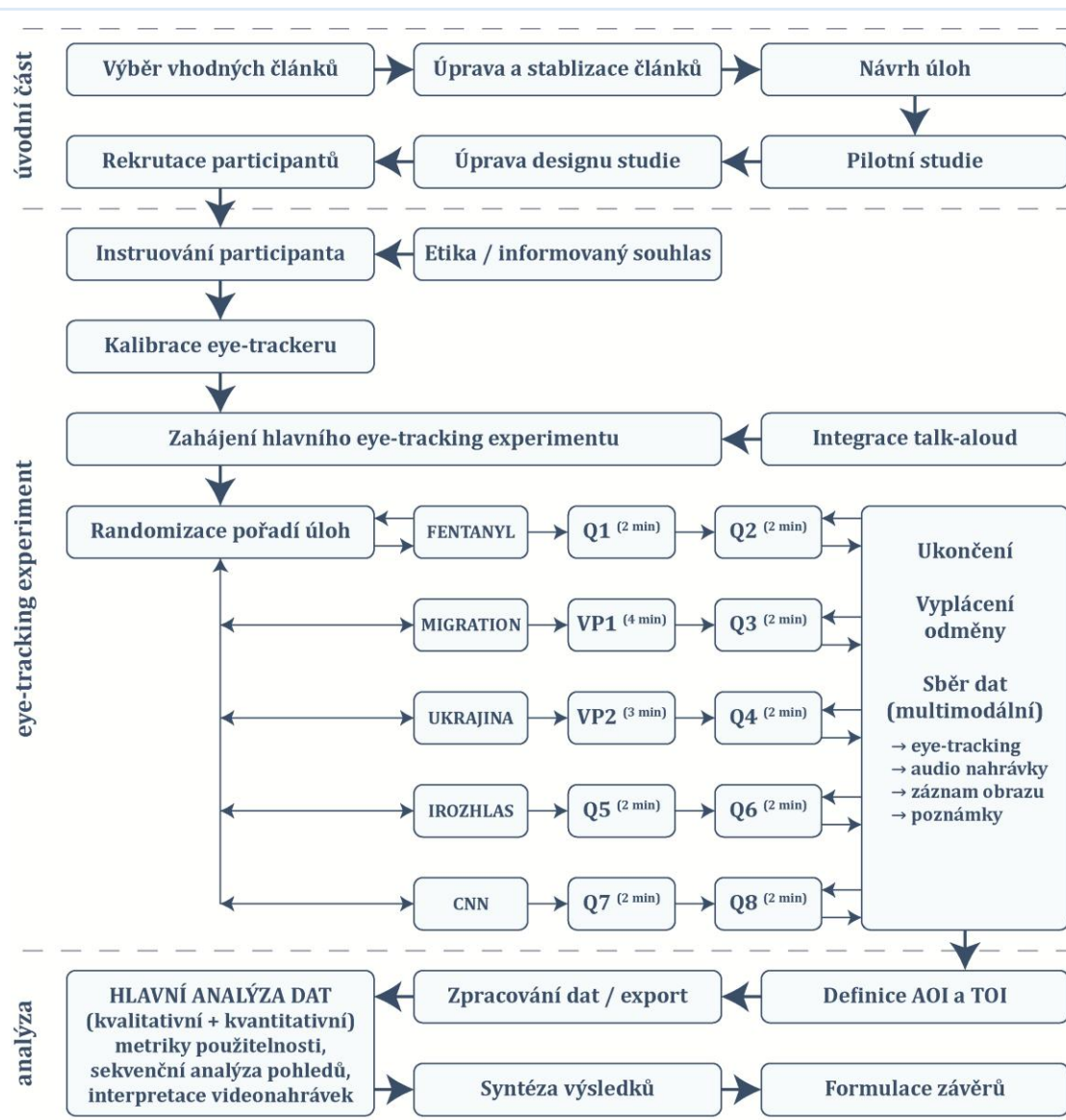
Jednotlivé úlohy byly navrženy tak, aby reflektovaly reálné situace, ve kterých čtenář článku vyhledává **konkrétní informaci prostřednictvím mapy**, a současně aby pokrývaly různé úrovně kognitivní náročnosti. Z hlediska typologie identifikované v rámci systematického mapování (DC1) lze tyto úlohy interpretovat především jako vyhledávací, srovnávací, identifikační a interpretační. Vyhledávací úlohy byly zaměřeny na odečet konkrétní hodnoty nebo informace z mapy, srovnávací úlohy vyžadovaly porovnání více prostorových jednotek či hodnot, identifikační úlohy spočívaly ve výběru více entit splňujících dané kritérium a interpretační úlohy vyžadovaly hlubší porozumění datům, například ve smyslu změny v čase nebo vztahu mezi sledovanými jevy. Tento mix úloh umožnil komplexněji postihnout různé aspekty interakce s mapou, od základního odečtu až po interpretaci vizualizovaného sdělení.

Každá úloha byla časově omezena **na 120 sekund**. Toto omezení představuje kompromis mezi dostatečným časem pro řešení a simulací reálného kontextu čtení, kde uživatel typicky nevěnuje jednotlivým prvkům neomezenou pozornost. V případě, že participant v daném časovém limitu neodpověděl, byla úloha považována za neúspěšnou, což umožnilo jednoznačné kvantitativní vyhodnocení efektivity a efektivnosti. U úloh VP byl časový limit delší (180–240 sekund), aby měl participant prostor pro spontánní orientaci v článku a případné objevování interaktivních prvků bez tlaku na splnění konkrétního cíle.

Samotný průběh experimentu byl realizován jako laboratorní studie s předem definovaným a standardizovaným postupem (**Obrázek 50**). Po výběru následovala stabilizace obsahu (tj. omezení reklam a zachování odkazů), v případě delších textů pak došlo k jejich následné úpravě, přičemž tato úprava se dotkla zejména článku UKRAJINA³⁷. Před zahájením hlavního

³⁷ Upravená verze článku UKRAJINA: Vaníček, Tomáš. *Ukrajina – interaktivní mapa*. Online. Dostupné z: https://vanicektomas.github.io/ukrajina_final.html. [cit. 2026-04-30].

sběru dat byl také proveden pilotní test na malém vzorku participantů ($n = 3$), jehož cílem bylo ověřit srozumitelnost zadání úloh, adekvátnost časových limitů a technickou funkčnost prostředí. Na základě pilotního testování byly provedeny dílčí úpravy zadání i organizace experimentu. V úvodní fázi vlastního experimentu byli participanté seznámeni s jeho průběhem, podepsali informovaný souhlas a obdrželi instrukce k metodě talk-aloud. Následně proběhla kalibrace eye-tracking zařízení. Vlastní experiment probíhal tak, že participant postupně procházel jednotlivé články, přičemž jejich pořadí bylo pro každého participanta randomizováno, aby se eliminoval vliv pořadí a efektu učení. U článků MIGRATION a UKRAJINA participant nejprve absolvoval fázi volného procházení (VP1 a VP2), po níž následovalo řešení konkrétních úloh. Během plnění úloh byl aplikován přístup talk-aloud, kdy participant verbalizoval své odpovědi a v omezené míře také své aktuální kroky či rozhodnutí. Tento přístup byl zvolen s ohledem na snahu zachovat relativně přirozený způsob čtení a interakce s článkem, na rozdíl od plnohodnotné metody think-aloud, která by mohla výrazněji zasahovat do kognitivního procesu.



Obrázek 50: Přehled jednotlivých fází experimentu PS1.

Role moderátora byla v průběhu experimentu minimalizována, aby nedocházelo k ovlivnění chování participantů. Moderátor zasahoval pouze v případě technických problémů a současně pořizoval stručné poznámky o průběhu experimentu, které následně sloužily jako podpůrný kontext při analýze dat. Během experimentu byla paralelně zaznamenávána data z více zdrojů, konkrétně **záznam očních pohybů, audiozáznam verbalizace, obrazovka počítače a poznámky moderátora**. Tento multimodální přístup tak umožnil detailnější rekonstrukci průběhu řešení jednotlivých úloh a podporoval interpretaci eye-tracking dat.

Celkový experiment tak kombinoval řízené úlohy s jednoznačně definovaným cílem a volné procházení bez explicitního zadání, čímž umožnil zachytit jak cílené, tak spontánní aspekty uživatelského chování. Zároveň propojil kvantitativní ukazatele výkonnosti s kvalitativní interpretací chování participantů, což je v kontextu formativní analýzy podstatné pro identifikaci konkrétních problémů použitelnosti. Tento přístup tak umožnil nejen určit, zda uživatel úlohu splnil, ale také pochopit, jakým způsobem k řešení dospěl, případně kde a proč došlo k selhání interakce či interpretace vizualizace.

7.1.3 Participantů (PS1)

Výzkumný soubor participantů byl sestaven s cílem postihnout jak běžné uživatele datově žurnalistických článků, tak osoby s vyšší mírou doménové znalosti v oblasti práce se sociodemografickými daty. Celkem se experimentu zúčastnilo **44 participantů**, kteří byli záměrně rozděleni do dvou stejně početných skupin, a to na **experty** (n = 22) a **laiky** (n = 22). Toto rozdělení bylo stanoveno před zahájením experimentu a vycházelo ze snahy identifikovat případné rozdíly v chování uživatelů v závislosti na jejich odbornosti.

Rekrutace participantů probíhala kombinací cíleného a oportunistického výběru. Skupina expertů byla oslokována prostřednictvím profesních a akademických kontaktů, zejména mezi osobami působícími v oblastech souvisejících s interpretací a komunikací sociodemografických dat, např. žurnalistika, sociologie, kulturní antropologie či příbuzné obory. Skupina laiků byla tvořena běžnými uživateli odpovídajícími typickému publiku online zpravodajských médií, tedy osobami bez specializované odbornosti v dané problematice. V obou případech byl kladen důraz na to, aby participanté neměli předchozí zkušenost s konkrétními testovanými články, čímž se minimalizoval vliv znalosti obsahu na výsledky.

Z hlediska demografických charakteristik představoval výzkumný soubor relativně **heterogenní skupinu participantů**, ačkoliv bylo možné předpokládat mírné zastoupení mladších věkových kategorií, jenž odpovídá běžné dostupnosti participantů v akademickém prostředí. Přestože detailní demografická struktura nebyla primárním předmětem kvantitativní analýzy, složení vzorku odpovídalo cílové skupině uživatelů datově žurnalistických článků, tedy osobám, které běžně konzumují online obsah a byly zvyklé pracovat s digitálními vizualizacemi.

Motivace participantů k účasti v experimentu byla zajištěna **finanční odměnou** reflektující časovou náročnost experimentu i rozdílnou dostupnost obou skupin respondentů. Konkrétně experti obdrželi odměnu ve výši **500 Kč**, zatímco laici byli odměněni částkou **250 Kč**. Diferencované odměňování bylo zvoleno s ohledem na náročnější rekrutaci odborníků a odpovídalo běžné praxi výzkumu, kde je cílem zajistit adekvátní motivaci všech účastníků.

Takto koncipovaný výzkumný soubor umožnil nejen obecné zhodnocení použitelnosti interaktivních map v datové žurnalistice, ale také porovnání mezi uživateli s různou úrovní doménové znalosti a následnou interpretaci rozdílů v jejich chování při řešení úloh.

7.1.4 Analýza dat (PS1)

Analýza dat v rámci PS1 byla založena na kombinaci záznamu očních pohybů, kvalitativní inspekce chování participantů, AOI analýzy, sekvenční vizualizace eye-tracking dat v nástroji GazePlotter a výpočtu základních metrik použitelnosti. Oční pohyby byly zaznamenány stacionárním eye-trackerem Tobii Pro Spectrum se vzorkovací frekvencí 300 Hz a experiment byl řízen v prostředí Tobii Pro Lab. Vedle samotného eye-tracking záznamu byl pořizován také zvukový záznam verbalizace pomocí externího mikrofону Trust GXT 232 a moderátor současně zaznamenával poznámky k průběhu experimentu na samostatném notebooku. Pro následnou vizualizaci a explorativní analýzu sekvencí pohledu byl využit GazePlotter (v1.6.6) a doplnkově také tabulkové zpracování exportovaných dat v Microsoft Excel.

Z metodologického hlediska byla analýza vedena ve dvou vzájemně propojených rovinách. První rovinu tvořila **kvalitativní behaviorální diagnostika**, založená na opakovaném procházení záznamů obrazovky, záznamů pohledu, verbalizovaných odpovědí a poznámek moderátora. Tato část sloužila především k identifikaci situací, v nichž participant mapový prvek přehlédli, nepochopili jeho funkci, nesprávně interpretovali zobrazenou hodnotu nebo sice fixovali relevantní oblast, ale nedokázali ji převést do správné odpovědi. Druhou rovinu tvořila **kvantitativní analýza**, v níž byly sledovány ukazatele úspěšnosti, času řešení, obtížnosti úloh, chybovosti a kompozitního skóre respondenta. Tento kombinovaný přístup odpovídal formativnímu charakteru studie, protože cílem nebylo pouze změřit výkon participantů, ale především odhalit konkrétní problémy návrhu interaktivních map v prostředí datové žurnalistiky.

Základní jednotkou eye-tracking analýzy byly **fixace**. Fixace zde byly interpretovány jako okamžiky relativně stabilizovaného pohledu na konkrétní část stimulu a byly využity jako indikátory alokace vizuální pozornosti. Fixace byly detekovány v prostředí Tobii Pro Lab pomocí filtru *I-VT Gaze Filter* s výchozím nastavením. Pro účely interpretace nebyly posuzovány izolovaně, ale ve vztahu k předem vymezeným oblastem zájmu, tedy **AOI**. Právě AOI představovaly klíčový analytický aparát této studie, protože umožnily převést kontinuální pohyb pohledu nad komplexním webovým článkem do strukturované podoby odpovídající funkčním částem rozhraní.

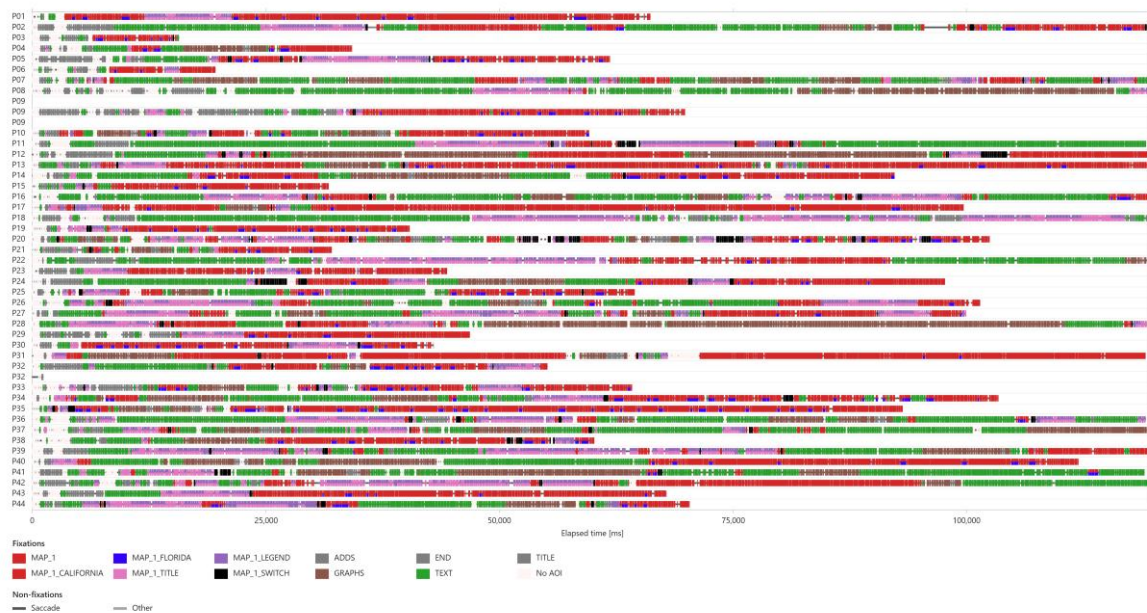
AOI byly vytvořeny samostatně pro každý stimul, tedy pro každý z pěti testovaných článků. Tento postup byl nezbytný, protože články pocházely z různých zpravodajských zdrojů a jejich webová kompozice se výrazně lišila. Segmentace proto nebyla navržena jako jednotná šablona použitelná napříč všemi články, ale jako specifické vymezení funkčních prvků každého článku. AOI byly kresleny v prostředí Tobii Pro Lab nad screenshoty jednotlivých článků a byly vymezeny tak, aby pokrývaly celé významové a funkční části rozhraní bez ohledu na jejich absolutní velikost na obrazovce. Typicky šlo o textové bloky, mapové vizualizace (interaktivní i statické), grafické prvky, nadpisy, ovládací prvky, legendy, případně další části rozhraní, které mohly ovlivnit orientaci participanta v článku (**Obrázek 51**). Tento postup byl důležitý zejména proto, že článek nepředstavoval izolovanou mapu, ale komplexní narativní prostředí, v němž mapa soutěžila o pozornost uživatele s textem a dalšími vizuálními prvky.



Obrázek 51: Ukázka vymezených AOI u částí tří vybraných článků.

AOI analýza sloužila k posouzení toho, kam participanti v jednotlivých fázích experimentu směřovali pozornost, jak dlouho se věnovali vybraným částem a jak mezi těmito částmi přecházeli. V případě fází volného procházení bylo možné na základě AOI rozlišit, zda participant věnoval pozornost primárně textové části, mapové vizualizaci, jiným grafickým prvkům nebo ovládacím komponentám. Tato rovina byla důležitá zejména proto, že během volného procházení nebyl participant veden konkrétní otázkou a jeho chování proto lépe odráželo přirozenou strategii čtení a explorační čtení článku. Výsledky tak ukázaly, zda interaktivní mapa sama o sobě přitahovala pozornost, nebo zda zůstávala ve stínu textového narativu.

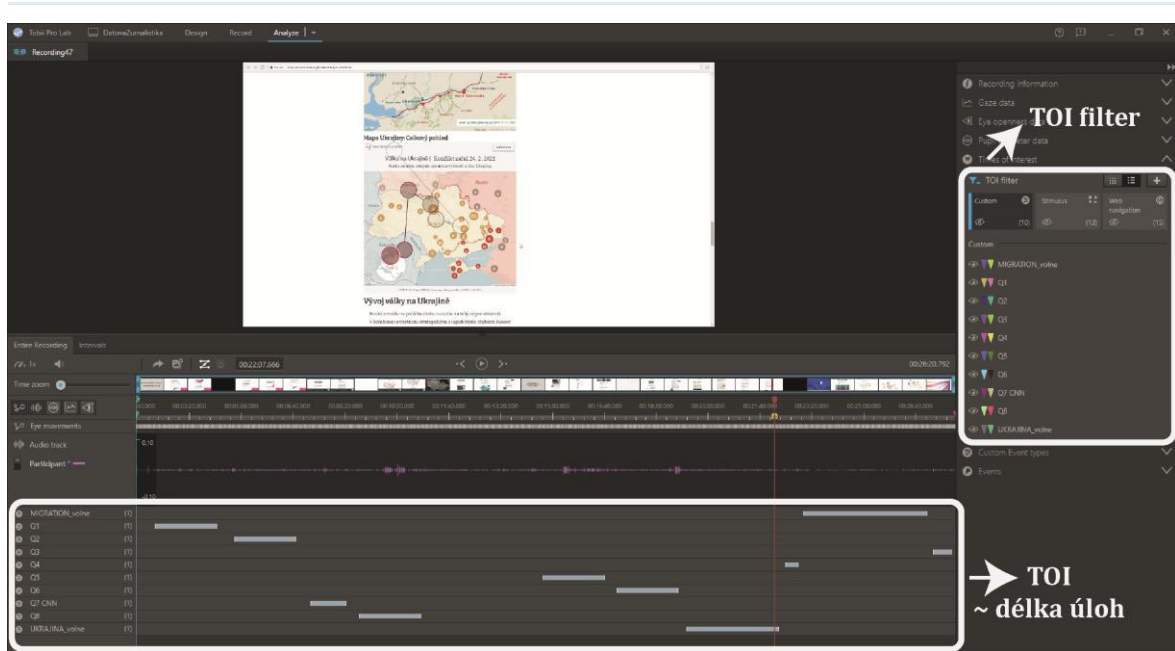
Po vytvoření AOI byla data exportována z Tobii Pro Lab pro další zpracování. Exportované sekvence navštívených AOI byly následně nahrány do prostředí GazePlotter, kde byly vizualizovány pomocí **sekvenčních grafů** (Obrázek 52). Ty umožnily sledovat časovou posloupnost přechodů mezi oblastmi zájmu u jednotlivých participantů a porovnávat strategie procházení článku. Barevné nastavení AOI v nástroji GazePlotter bylo upravováno podle konkrétního článku a podle toho, jaký vzorec chování měl být zvýrazněn. Tento krok byl důležitý pro identifikaci přechodů mezi textem, mapou, legendou a dalšími prvky rozhraní. Současně se však ukázalo, že samotný sekvenční graf nebyl pro hodnocení použitelnosti interaktivních vizualizací dostačující, protože z něj nebylo možné jednoznačně určit, zda participant interaktivitu skutečně použil, nebo se na daný prvek pouze díval. Z tohoto důvodu byla sekvenční analýza chápána jako podpůrná metoda a byla doplněna manuální inspekcí záznamů.



Obrázek 52: Ukázka sekvenčního grafu z nástroje GazePlotter pro úlohu Q7.

Manuální inspekce videozáznamů byla v této studii důležitá. Do hloubkové kontroly byly zařazeny především případy, v nichž účastníci odpověděli nesprávně, neodpověděli vůbec nebo se v jejich chování objevily nestandardní vzorce zaznamenané moderátorem. Tento postup umožnil propojit kvantitativní výsledek úlohy s konkrétní behaviorální situací. Bylo tak možné rozlišovat, zda chyba vznikla v důsledku přehlédnutí relevantního prvku, nesprávného porozumění zadání, neobjevené interaktivity, chybné interpretace hodnoty nebo technického či navigačního problému. Talk-aloud záznamy v této fázi sloužily především jako doplňkový interpretační zdroj. Nebyly systematicky přepisovány ani kódovány pomocí formálního kvalitativního kódovacího schématu, ale pomáhaly upřesnit záměr účastníka, míru nejistoty nebo okamžik, v němž došlo k chybnému rozhodnutí.

Vedle AOI byly v Tobii Pro Lab definovány také **TOI**, tedy *Time of Interest*. Ty byly použity pro časové vymezení jednotlivých úloh (**Obrázek 53**). U každé otázky byl TOI vymezen od okamžiku zobrazení zadání po verbalizovanou odpověď účastníka. Tento způsob umožnil standardizovaně měřit dobu plnění úkolu a následně ji porovnávat mezi účastníky i mezi úlohami. Pokud účastník neodpověděl v časovém limitu 120 sekund, byla doba řešení nastavena na hodnotu 120 sekund a úloha byla hodnocena jako neúspěšná. Tento postup odpovídal experimentálnímu designu s pevně stanoveným časovým limitem a umožnil pracovat s časem jako s metrikou efektivity.



Obrázek 53: Náhled na vytvořené TOI v prostředí Tobii Pro Lab.

Kvantitativní část analýzy zahrnovala několik vzájemně navazujících metrik. Nejprve byla vyhodnocena úspěšnost odpovědí, tedy efektivita plnění úloh. Každá odpověď byla kódována na dvoubodové škále, kde správná odpověď získala hodnotu 2 a nesprávná nebo chybná odpověď hodnotu 1. **Na úrovni úloh** byla následně vypočítána procentuální úspěšnost (**vzorec 1**) jako podíl správných odpovědí ze všech odpovědí na danou otázku:

$$Uspesnost_q = \frac{n_{spravne,q}}{n_{celkem,q}} \times 100 \quad (1)$$

kde $n_{spravne,q}$ označovalo počet správných odpovědí u úlohy q a $n_{celkem,q}$ celkový počet participantů, kteří danou úlohu řešili. **Na úrovni participanta** byla obdobně vyjádřena procentuální úspěšnost (**vzorec 2**) jako podíl správně vyřešených úloh z osmi zadaných otázek:

$$Uspesnost_p = \frac{n_{spravne,p}}{n_{q,p}} \times 100 \quad (2)$$

kde $n_{spravne,p}$ označovalo počet správných odpovědí participanta p a $n_{q,p}$ celkový počet úloh, které participant p řešil.

Dále byla stanovena **empirická obtížnost jednotlivých úloh**. Ta nebyla určována na základě subjektivních výpovědí participantů, protože metoda talk-aloud byla využita pouze jako doplňkový interpretační nástroj a část participantů verbalizovala velmi stručně. Obtížnost proto byla odvozena z průměrné úspěšnosti úlohy napříč všemi participanty. Úlohy byly následně rozděleny do tercilů (**Tabulka 7**), kde hodnota ($D_q = 1$) označovala nejobtížnější úlohy, hodnota ($D_q = 2$) úlohy střední obtížnosti a hodnota ($D_q = 3$) nejsnazší úlohy. Tento postup umožnil zahrnout do výsledného hodnocení skutečnost, že správná odpověď na obtížnější úlohu měla vyšší interpretační význam než správná odpověď na úlohu s vysokou úspěšností.

Tabulka 7: Průměrná úspěšnost úloh a rozdělení úloh do tercilů (D_q) na základě obtížnosti

ID úlohy	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
Průměrná úspěšnost úlohy	1,34	1,64	1,80	1,68	1,50	1,77	1,68	1,20
Průměrná úspěšnost úlohy [%]	34,09	63,64	79,55	68,18	68,18	77,27	68,18	20,45
Stanovený tercil D_q	1	2	3	3	3	3	3	1

Třetí složkou byla **doba plnění úlohy**, tedy metrika efektivnosti. Časy byly získány z TOI v Tobii Pro Lab a pro každou úlohu byly samostatně rozděleny do tercilů. Hodnota $T_{pq} = 3$ označovala nejrychlejší třetinu participantů v úloze q , hodnota $T_{pq} = 2$ střední třetinu a hodnota $T_{pq} = 1$ nejpomalejší třetinu. Tercilové rozdělení bylo použito proto, aby se snížila citlivost výsledků na extrémní hodnoty a aby bylo možné porovnávat rychlost řešení napříč úlohami s rozdílnou náročností.

Na základě těchto tří složek bylo vypočítáno **kompozitní skóre respondenta (vzorec 3)**. Tato metrika byla vytvořena proto, že samotná úspěšnost nepostihovala celkovou efektivitu práce s vizualizací. Participant mohl odpovědět správně, ale dospět k odpovědi velmi pomalu, případně mohl uspět pouze u jednoduchých úloh. Kompozitní skóre proto kombinovalo správnost, empirickou obtížnost a rychlost řešení. Výpočet byl formulován následovně:

$$Skore_p = \sum_{q=1}^8 \left(\frac{S_{pq}}{D_q} \times T_{pq} \right) \quad (3)$$

kde $Skore_p$ představovalo **celkové skóre participanta p** , S_{pq} označovalo úspěšnost participanta p v úloze q kódovanou hodnotou 2 pro správnou odpověď a hodnotou 1 pro nesprávnou nebo chybějící odpověď, D_q označovalo tercil obtížnosti úlohy a T_{pq} rychlostní tercil participanta v dané úloze. Maximální dosažitelné skóre v tomto schématu činilo 29 bodů. Tato metrika zvýhodňovala správné a rychlé řešení obtížnějších úloh a současně umožnila srovnat výkonnost jednotlivých participantů přes celý experiment.

Jako doplňkový ukazatel byla sledována **chybovost** ve smyslu korekcí po zopakování úlohy. Tento indikátor byl zaměřen na situace, kdy bylo participantovi po první nesprávné odpovědi zadání úlohy zopakováno a měl tak možnost odpověď opravit. Smyslem nebylo pouze evidovat chyby, ale rozlišit mezi nepochopením zadání a selháním při práci s vizualizací. Pokud participant po zopakování otázky odpověď opravil, mohlo to naznačovat problém v porozumění otázce nebo v prvotní orientaci v kontextu. Pokud ani opakování nevedlo ke správné odpovědi, byla pravděpodobnější příčina v samotné použitelnosti vizualizace, interakčním mechanismu nebo interpretaci zobrazených dat.

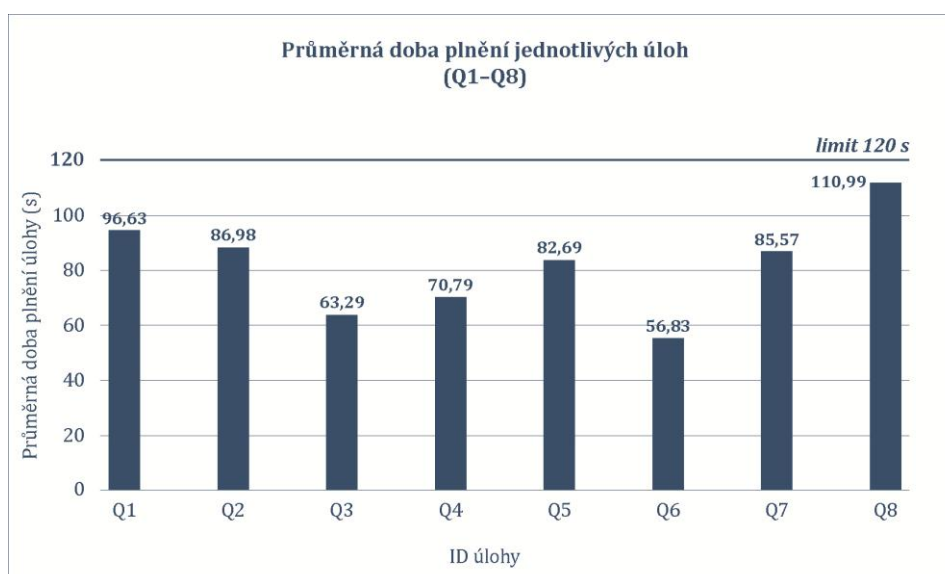
Analýza byla provedena na **třech úrovních agregace**. Na **úrovni úlohy** byly sledovány rozdíly mezi otázkami Q1–Q8, zejména úspěšnost, průměrný čas řešení a empirická obtížnost. Na **úrovni participanta** bylo vyhodnoceno celkové skóre a individuální vzorce chování. Na **úrovni skupin** bylo provedeno deskriptivní porovnání expertů a laiků, přičemž cílem nebylo silné inferenční zobecnění, ale explorativní posouzení toho, zda doménová znalost vedla

k odlišným strategiím práce s interaktivními mapami. Tento přístup odpovídal formativní povaze studie, v níž měly výsledky primárně sloužit k identifikaci problémů a návrhu designových doporučení.

Souhrnně byla analýza dat v PS1 postavena na **triangulaci více zdrojů evidence**. Eye-tracking poskytl informaci o vizuální pozornosti, AOI a TOI umožnily prostorovou a časovou segmentaci chování, GazePlotter podpořil analýzu sekvencí pohledu a metriky použitelnosti umožnily kvantifikovat efektivitu a efektivnost řešení úloh. Manuální inspekce záznamů a talk-aloud záznamy následně doplnily vysvětlující rovinu, bez níž by nebylo možné rozlišit pouhé sledování prvku od jeho skutečného pochopení a použití. Tato kombinace byla pro studii podstatná, protože interaktivní mapy v datové žurnalistice nebyly hodnoceny jen jako vizuální objekty, ale jako funkční prvky zasazené do komplexního textového a grafického prostředí online článku.

7.1.5 Hlavní zjištění (PS1)

Případová studie PS1 přinesla několik významných zjištění týkajících se použitelnosti IKV v prostředí datové žurnalistiky, a současně poskytla důležité metodologické poznatky pro další části této disertační práce. Z hlediska uživatelského výkonu se ukázalo, že samotná přítomnost interaktivní mapy v článku automaticky **nevedla k efektivnímu získání informace**. Průměrná úspěšnost řešení úloh dosáhla hodnoty 57,67 %, přičemž mezi jednotlivými úlohami existovaly výrazné rozdíly. Nejvyšší úspěšnosti dosáhly úlohy Q3 (79,55 %) a Q6 (77,27 %), zatímco nejméně úspěšné byly úlohy Q8 (20,45 %) a Q1 (34,09 %), viz **Tabulka 6**. Výsledky současně ukázaly, že nejméně úspěšné úlohy byly zároveň časově nejnáročnější (**Obrázek 54**). Nejdelší průměrný čas řešení byl zaznamenán u úlohy Q8 (110,99 s), která byla současně nejméně úspěšnou úlohou v celém experimentu. Naopak nejkratší průměrný čas řešení vykazovala úloha Q6 (56,83 s), která patřila mezi nejúspěšnější úlohy. Tento vztah mezi nízkou úspěšností a vysokým časem řešení naznačoval zvýšenou kognitivní náročnost úloh nebo nízkou srozumitelnost interaktivního mechanismu použitého v dané vizualizaci.

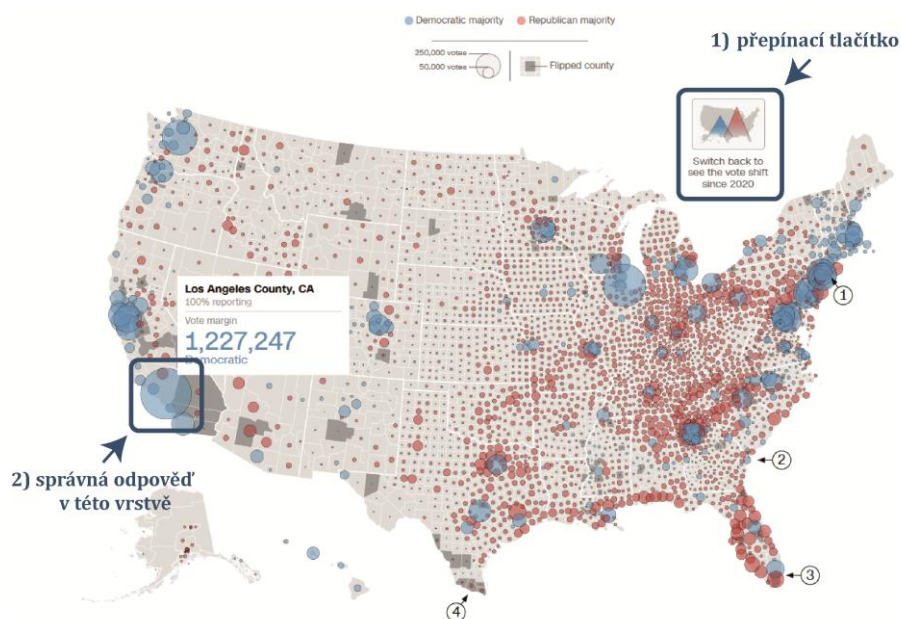


Obrázek 54: Průměrná doba plnění jednotlivých úloh (Q1–Q8) v rámci případové studie PS1.

Na úrovni **jednotlivých participantů** se ukázalo, že nejúspěšnějším participantem byl P33 ze skupiny laiků, který správně vyřešil všechny úlohy (100 %). Naopak nejméně úspěšnými byli participant P18 ze skupiny expertů a participant P22 ze skupiny laiků, kteří dosáhli shodně pouze 12,5% úspěšnosti. Tento výsledek ukázal, že samotná doménová znalost automaticky negarantovala úspěšné zvládnutí interaktivních prvků a že problémy použitelnosti se objevovaly napříč oběma skupinami participantů. Při výpočtu kompozitního skóre, které kombinovalo úspěšnost, obtížnost úloh a rychlost řešení, dosáhli nejvyšší hodnoty participant P03 ze skupiny expertů a participant P33 ze skupiny laiků, oba shodně 24,33 bodu. Zajímavé bylo, že participant P03 byl podle samotné úspěšnosti až čtvrtý nejlepší (7 správných odpovědí z 8), avšak díky rychlejšímu řešení obtížnějších úloh dosáhl nejvyššího výsledného skóre. Tento výsledek tak potvrdil význam zahrnutí efektivnosti do hodnocení použitelnosti a ukázal, že samotná správnost odpovědí neposkytovala dostatečně citlivý obraz o skutečném výkonu participantů.

Významná část problémů nebyla spojena s absencí vizuální pozornosti, ale s **nesprávným pochopením funkce** rozhraní. Eye-tracking záznamy opakovaně ukazovaly situace, kdy participant relevantní prvek skutečně fixoval, avšak nepochopil jeho význam nebo neodhalil jeho interaktivitu. Tento jev byl patrný zejména u prvků založených na „hover“ interakci, kde nebyla interaktivita dostatečně vizuálně signalizována. Participant v některých případech předpokládali, že mapa je pouze statickým obrázkem, a vůbec se nepokusili s ní interagovat. V jiných situacích sice interakci provedli, ale nepochopili změnu zobrazených dat nebo nedokázali interpretovat nově zobrazenou hodnotu. Tyto situace potvrzovaly, že samotná fixace na prvek nemusela automaticky znamenat jeho kognitivní zpracování nebo správnou interpretaci.

Zvlášť problematickou se ukázala úloha Q8 pracující s vizualizací CNN. Většina participantů zde nedokázala správně odpovědět již při prvním pokusu a současně používala téměř výhradně **výchozí mapovou vrstvu**. Přepínací mechanismus vedoucí k sekundární mapě vykazoval **velmi nízkou objevitelnost** a jeho interaktivní potenciál byl omezený (**Obrázek 55**). Řada participantů vůbec nepochopila, že existuje další vrstva obsahující potřebnou informaci. Někteří participant navíc podle záznamů zřejmě správnou odpověď našli, avšak nestihli ji verbalizovat před uplynutím časového limitu. Je také nutné upozornit na to, že část obtížnosti mohla souviset s anglickým jazykem článku, protože někteří participant vykazovali známky nejistoty při interpretaci textových instrukcí a popisků.



Obrázek 55: Označení tlačítka (1) pro přepnutí mezi vrstvami mapy a správné odpovědi (2).

Analýza AOI během fází volného procházení ukázala, že participanti věnovali výrazně více pozornosti **textové části článků** než samotným mapovým vizualizacím. Po normalizaci vzhledem k velikosti AOI v pixelech se ukázalo, že laici věnovali textovým částem článků přibližně **10,91×** více relativní pozornosti než grafickým prvkům, zatímco u expertů byl tento poměr dokonce **17,46×**. Interaktivní mapa tak v mnoha případech fungovala spíše jako doprovodný prvek textového narativu než jako hlavní zdroj informace. Tento výsledek byl důležitý zejména v kontextu datové žurnalistiky, kde bývají mapy často navrhovány jako klíčový komunikační prostředek. Ukázalo se však, že v konkurenčním prostředí webového článku musí mapa aktivně bojovat o pozornost uživatele, a pokud interaktivita nebyla dostatečně zřetelná, uživatel zůstával primárně u textového obsahu. **Sekvenční analýza** v nástroji GazePlotter dále ukázala, že participanti často přecházeli mezi textem a mapou pouze omezeně a u části participantů téměř nedocházelo k hlubší exploraci interaktivních prvků. Sekvenční grafy současně umožnily identifikovat situace, kdy participant během časového limitu vůbec nedospěl k zamýšlenému interaktivnímu prvku, což bylo následně ověřováno cílenou kontrolou odpovídajících záznamů.

Další významné zjištění se týkalo **rozdílů mezi experty a laiky**. Přestože experti v průměru dosahovali mírně lepších výsledků, rozdíly nebyly natolik výrazné, aby bylo možné tvrdit, že doménová znalost sama o sobě eliminovala problémy použitelnosti. Současně se ukázalo, že skupina expertů vykazovala nižší variabilitu výsledků, zatímco skupina laiků byla výrazně heterogennější. I odborně zaměření participanti se dopouštěli chyb souvisejících s přehlédnutím interaktivních prvků nebo nesprávnou interpretací dat z map. Tento výsledek naznačil, že část problémů byla skutečně způsobena **návrhem rozhraní**, nikoliv pouze nedostatečnými znalostmi uživatelů. Zároveň se ukázalo, že experti častěji používali systematictější strategie procházení článku a častěji kombinovali informace z textu a mapy, zatímco laici se více spoléhali na první vizuálně dominantní prvek.

Na základě identifikovaných problémů byla **formulována doporučení** pro návrh interaktivních map v datové žurnalistice. Za klíčové bylo považováno především zvýšení vizuální objevitelnosti interaktivních prvků. Interaktivní komponenty měly být navrženy tak, aby uživatel již při prvním pohledu rozpoznal možnost interakce. Dále bylo doporučeno omezit nadbytečné vizuální prvky, které odváděly pozornost od mapy, a posílit vizuální vazbu mezi textem a mapovou částí článku. Výsledky rovněž ukázaly význam okamžité zpětné vazby po provedení interakce, protože část participantů si ani po kliknutí nebo „hover“ akci neuvědomila, že se obsah mapy změnil. V některých případech bylo doporučeno doplnit explicitní instrukce nebo vizuální nápovědy vysvětlující princip práce s mapou.

Studie současně naznačila **význam pořadí jednotlivých vizualizací** v rámci článku. U části participantů bylo pozorováno, že pokud se v úvodní části článku nacházel statický mapový nebo grafický prvek, do něhož se participant pokoušel kliknout a nedošlo k žádné reakci, snižovala se následně jeho ochota zkoušet interaktivitu u dalších vizualizací v článku. Participant si tak vytvářeli implicitní očekávání, že vizualizace v daném článku nejsou interaktivní, a u dalších prvků již interakci vůbec nezkoušeli. Tento efekt se projevoval zejména u participantů, kteří článek procházeli rychleji a více spoléhali na okamžité vizuální signály. Na základě tohoto pozorování bylo doporučeno řadit interaktivní vizualizace v rámci článku před statické prvky, případně alespoň zajistit, aby první významnější vizualizace v článku jasně demonstrovala možnost interakce. Současně se ukázalo jako důležité aktivně upozorňovat uživatele na interaktivitu prvku, například pomocí animace, zvýraznění nebo krátké instrukce. Výsledky tak naznačily, že objevitelnost interakce nebyla závislá pouze na samotném návrhu mapy, ale také na širším sekvenčním kontextu, v jakém byly vizualizace v článku prezentovány. Vedle uživatelských zjištění měla studie význam i z **metodologického hlediska** pro potřeby této disertační práce. PS1 představovala jednoduchý typ experimentu nad IKV, protože testované mapy umožňovaly pouze omezenou interaktivitu a participant během řešení úloh zpravidla neměnili měřítko mapy ani neprováděli posuny mapového výřezu. Tato skutečnost vytvořila vhodné podmínky pro ověření, zda bylo možné pro podobný typ interaktivních stimulů stále efektivně využívat tradiční analytické přístupy. Výsledky ukázaly, že klasická AOI analýza založená na screenshotu rozhraní byla v tomto kontextu **stále použitelná** a poskytovala interpretovatelná data o alokaci vizuální pozornosti. Současně se ukázalo, že kombinace AOI, TOI, sekvenční analýzy a kvalitativní inspekce záznamů umožnila relativně robustní diagnostiku problémů použitelnosti i bez nutnosti využití pokročilých metod.

Studie zároveň ukázala **limity čistě kvantitativního přístupu**. Samotné metriky fixací nebo časů řešení často nedokázaly vysvětlit skutečnou příčinu chyby. Teprve propojení eye-tracking dat s manuální inspekci záznamů a verbalizací participantů umožnilo pochopit, zda participant interaktivní prvek přehlédl, nepochopil nebo nesprávně interpretoval.

Z pohledu celé disertační práce představovala PS1 důležitý výchozí bod. Studie ukázala, že u méně dynamických interaktivních stimulů bylo možné efektivně aplikovat tradiční eye-tracking workflow založené na AOI definovaných nad screenshotem rozhraní. Současně však naznačila, že s rostoucí mírou interaktivity a variability mapového obsahu bude tento přístup postupně narážet na své limity, což se následně projevilo v dalších případových studiích této disertační práce.

ET projekt pro PS1 je k dispozici v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP.

PS2

7.2 Interaktivní srovnávač map „Proměny Olomouce v čase“ (PS2)

Hodnocený produkt	interaktivní srovnávač map <i>Proměny Olomouce v čase</i>
Základní metody	eye-tracking (vlastní interpretace dat), výpočet metrik použitelnosti , logování interakcí (<i>Tobii Pro Lab</i>), UEQ , doplňkový dotazník
Použité zařízení	Tobii Pro Spark (stacionární)
Hlavní nástroje	Tobii Pro Lab, Microsoft Excel (UEQ)
Počet úloh	4
Počet participantů	54

Druhá případová studie navázala na předchozí hodnocení interaktivních map v datové žurnalistice, avšak posunula výzkum směrem ke **komplexnější IKV**. Předmětem hodnocení byla webová mapová aplikace „Proměny Olomouce v čase“, která umožňovala vizuální porovnávání historických mapových podkladů a současného stavu města prostřednictvím několika režimů zobrazení. Z hlediska této disertační práce představovala PS2 důležitý metodologický mezistupeň, kdy zatímco PS1 se zaměřovala na relativně jednodušší interaktivní mapy zasazené do prostředí datové žurnalistiky, v této studii již bylo nutné pracovat s **dynamičtější mapovým rozhraním**, proměnlivým obsahem, více způsoby porovnávání a vyšší mírou uživatelské volnosti při průchodu aplikací.

Tato vyšší komplexita se promítla také do volby analytického přístupu. Eye-tracking zde byl využit především **kvalitativně**. Tato kvalitativní interpretace záznamů navázala na zkušenosti z PS1, kde se tento postup osvědčil při identifikaci nejistoty, přehlížení prvků rozhraní a rozdílů ve strategiích práce s mapou. Současně byla analýza rozšířena o **logované interakce** získané ze záznamů v Tobii Pro Lab, které umožnily rekonstruovat postup uživatelů v aplikaci a propojit jejich vizuální pozornost s konkrétními interakčními kroky. Třetí metodickou vrstvu tvořil **standardizovaný dotazník UEQ**, jenž poskytl rámec pro hodnocení subjektivně vnímané uživatelské zkušenosti. PS2 tak v rámci disertační práce sloužila nejen k ověření konkrétního interaktivního srovnávače historických map, ale především k rozšíření metodického rámce hodnocení IKV o situaci, kdy se eye-tracking data musela interpretovat v úzké vazbě na interakční logy a subjektivní hodnocení uživatelů.

★ [Q1] Tato PS2 je po prvním kole revizí (k 20. 05. 2026) v rámci článku: Popelka, S., Růžička, O., Viktořík, M., Vaníček, T., Bittner, O., Žejdlík, J., Burian, J. (2026). Development and Evaluation of a Web Application for Exploring the Historical Landscape of Olomouc. Cartography and Geographic Information Science.

7.2.1 Hodnocený produkt (PS2)

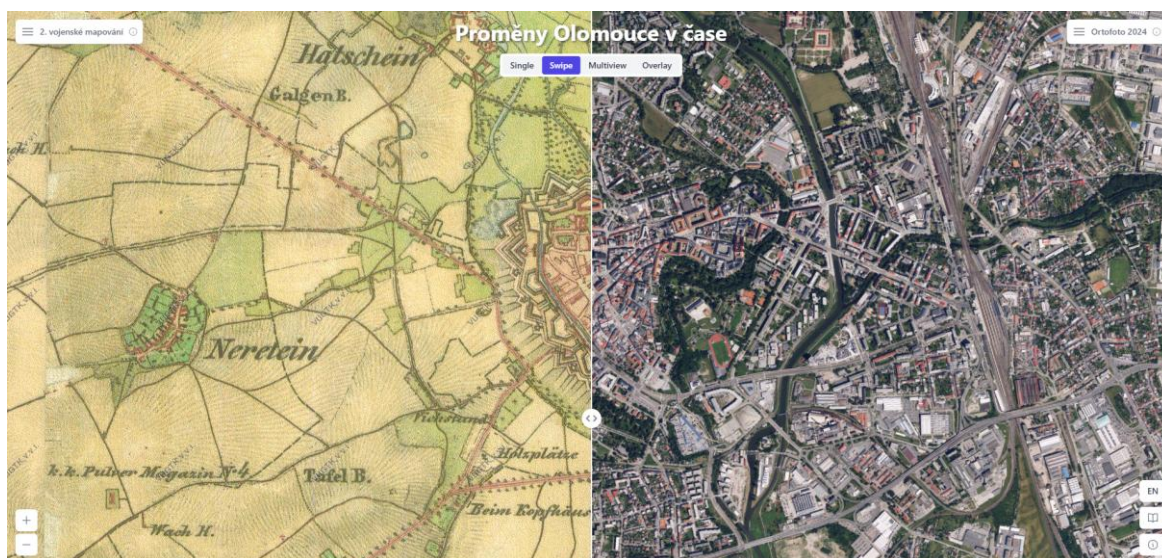
Hodnoceným produktem druhé případové studie **byla webová mapová aplikace „Proměny Olomouce v čase“³⁸**. Aplikace byla vytvořena jako interaktivní srovnávač historických mapových podkladů, leteckých snímků a ortofot, jehož hlavním účelem bylo umožnit vizuální interpretaci dlouhodobých prostorových proměn města Olomouce. Na rozdíl od běžných mapových prohlížečů, které zpravidla umožňují pouze zapínání a vypínání jednotlivých vrstev, byla aplikace koncipována jako prostředí pro časoprostorové porovnávání. Participant mohl pracovat s různými historickými a současnými mapovými podklady a porovnávat je prostřednictvím několika režimů zobrazení, zejména samostatného zobrazení, režimu Swipe, režimu Multiview a režimu Overlay. Tím aplikace podporovala nejen prosté prohlížení archivních map, ale především interpretační práci založenou na vizuálním porovnávání odlišných časových období, typů mapových pramenů a proměn městské struktury.

Aplikace vznikla jako **jeden z výstupů projektu „Olomouc ve 3D – nová dimenze kulturního dědictví města: minulost, přítomnost, budoucnost“³⁹** financovaného Ministerstvem kultury v rámci programu **NAKI III**. Projekt byl zaměřen na nové způsoby dokumentace, interpretace a prezentace kulturního dědictví města Olomouce, přičemž jedním z jeho výstupů byla právě interaktivní webová mapa umožňující srovnání současné podoby města s historickým stavem zachyceným v archivních mapových pramenech. Protože autor disertační práce byl součástí řešitelského týmu tohoto projektu, aplikace představovala přirozeně dostupný a odborně relevantní objekt pro empirické hodnocení. Výběr této aplikace pro PS2 byl zároveň podpořen tím, že šlo o produkt vzniklý v domácím institucionálním prostředí Katedry geoinformatiky UP a tematicky zaměřený na město, které tvořilo autorovo studijní i osobní zázemí. Tato vazba tak byla významná nejen z hlediska praktické dostupnosti aplikace a možnosti ovlivnit její další vývoj, ale také z hlediska hlubší motivace porozumět tomu, jak může být historický vývoj známého městského prostoru zprostředkován prostřednictvím IKV.

Z hlediska metodologického rámce disertační práce představovala aplikace vhodný objekt pro druhou případovou studii, protože oproti mapám hodnoceným v PS1 šlo o **komplexnější IKV** s výrazně dynamičtější obsahem a širší mírou uživatelské volnosti. Uživatelé zde nepracovali pouze s jednou mapovou kompozicí doplněnou o omezený počet interaktivních prvků, ale vstupovali do prostředí, v němž bylo možné měnit mapové podklady, posouvat a přibližovat mapu, volit odlišné režimy porovnávání a přizpůsobovat průchod aplikací vlastní strategii. Právě tato komplexita činila aplikaci vhodnou pro ověření dalšího stupně metodického postupu hodnocení IKV metodou eye-tracking. Současně šlo o aplikaci, u níž bylo možné kombinovat kvalitativní analýzu vizuální pozornosti, logované interakce a standardizované dotazníkové hodnocení uživatelské zkušenosti. Výchozí stav uživatelského rozhraní aplikace, zachycující základní komparativní zobrazení historického a současného mapového podkladu, zobrazuje **Obrázek 56**.

³⁸ **Popelka, Stanislav**, Ondřej Růžička, Jaroslav Burian, Michael Viktořík, Oldřich Bittner, Jakub Žejdlík, Tomáš Vaníček, Martina Mertová a Ondřej Jakubec. *Proměny Olomouce v čase* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2025 [cit. 2026-05-09]. Dostupné z: <https://mapy.olomouc.xyz>

³⁹ **Univerzita Palackého v Olomouci**. *Olomouc ve 3D: nová dimenze kulturního dědictví města: minulost, přítomnost, budoucnost* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2026 [cit. 2026-05-09]. Dostupné z: <https://3dolomouc.upol.cz/>



Obrázek 56: Náhled na výchozí stav aplikace „Proměny Olomouce v čase“.

-  Představení aplikace proběhlo v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Burian, J., **Vaníček, T.**, Žejdlík, J., Bittner, O., Viktorík, M., Jakubec, O. (2024). Digitální dimenze Olomouce: geovizualizace městského dědictví a jeho proměn. Ústí nad Labem: Výroční konference ČGS 2024. In *Sborník abstraktů Výroční konference ČGS v Ústí nad Labem, 2.–5. 9. 2024*, UJEP Ústí nad Labem, s. 13.
-  Představení aplikace proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Ruzicka, O., Burian, J., Zejdlik, J., **Vanicek, T.**, Bittner, O., Jakubec, O. (2025) Layers of Time: Comparing Past and Present of Olomouc Through Raster Maps, ICA DACH Prague.
-  Představení aplikace proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Ruzicka, O., Burian, J., Zejdlik, J., **Vanicek, T.**, Bittner, O., Jakubec, O. (2025) Proměny města Olomouce (poster), 26. kartografická konference, Brno.
-  Představení aplikace proběhlo také v rámci mezinárodního workshopu: Popelka, S., Růžička, O., Burian, J., Viktorík, M., Bittner, O., Žejdlík, J., **Vaníček, T.**, Mertová, M., & Jakubec, O. (2025) Olomouc through time: Explore the city's past and present. Documentation and Visualization of Urban Ecosystems: Data – History – Imagination, Online International Workshop.
-   Představení aplikace proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Růžička, O., Burian, J., Viktorin, M., Bittner, O., Žejdlík, J., **Vaníček, T.**, Mertová, M., & Jakubec, O. (2025). Proměny Olomouce v čase interaktivně / Olomouc through time – interactively. In *M. Kožuch & D. Kusendová (Eds.), Historické mapy 2025: Zborník abstraktov z medzinárodnej konferencie konanej 21.11.2025* (p. 48-50). Kartografická spoločnosť SR; Štátny geologický ústav Dionýza Štúra.
-   Tematické představení aplikace proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Burian, J., Ruzicka, O., **Vaníček, T.**, Zejdlik, J., Bittner, O., Jakubec, O. (2024). From medieval walls to modern maps: the virtual reconstruction of Olomouc's fortifications.

Bologna, Italy: CartoHeritage 2024 – 18th ICA Conference Digital Approaches to Cartographic Heritage. In *TSORLINI, A., BOUTOURA, C. (eds.). Abstracts – CartoHeritage 2024: 18th ICA Conference Digital Approaches to Cartographic Heritage*, 5. Aristotle University of Thessaloniki, Laboratory of Cartography & Geographical Analysis. <https://cartography.web.auth.gr/ICA-Heritage/Bologna2024>.

  Tematické představení aplikace proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: Popelka, S., Burian, J., Ruzicka, O., **Vaníček, T.**, Zejdlik, J., Bittner, O., & Jakubec, O. (2024). From medieval walls to modern maps: The virtual reconstruction of Olomouc's fortifications. In *A. Tsorlini & C. Boutoura (Eds.), Abstracts – CartoHeritage 2024: 18th ICA Conference Digital Approaches to Cartographic Heritage* (p. 5). Aristotle University of Thessaloniki, Laboratory of Cartography & Geographical Analysis.

  Představení aplikace autorem proběhlo také v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T.**, Popelka, S., Burian, J., Ruzicka, O., Zejdlik, J., Bittner, O., Jakubec, O. (2024). Interactive 2D Visualizations of Olomouc's Development as Tools for Revitalizing Cultural Heritage. *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 7, 179. Vídeň, Rakousko: EuroCarto 2024, <https://doi.org/10.5194/ica-abs-7-179-2024>.

7.2.2 Zadání úloh a průběh experimentu (PS2)

Scénář experimentu byl navržen tak, aby umožnil sledovat práci participantů s aplikací v několika odlišných situacích odpovídajících charakteru této IKV. Úlohy proto nebyly zaměřeny pouze na nalezení konkrétního místa v mapě, ale také na volnou exploraci prostředí, práci s historickými mapovými vrstvami a porovnávání odlišných časových stavů města. Z hlediska typologie úloh identifikované v rámci DC1 byly do experimentu zařazeny především úlohy explorativní, vyhledávací, srovnávací a interpretační. Jednotlivé úlohy však nebyly vždy jednoznačně oddělitelné do jedné kategorie, protože práce s interaktivním srovnávačem historických map přirozeně kombinovala vyhledávání lokalit, čtení mapového obsahu, změnu mapových vrstev a vizuální porovnávání historického a současného stavu.

První úloha měla explorativní charakter a sloužila k úvodnímu seznámení s aplikací pod dobu pěti minut. Účastníci během ní nebyli vedeni ke konkrétnímu cíli, ale mohli aplikaci volně procházet, přepínat mapové podklady, přibližovat, oddalovat a zkoušet dostupné režimy zobrazení. Tato část byla důležitá zejména proto, že umožnila zachytit spontánní způsob objevování rozhraní a prvotní orientaci v prostředí aplikace. Následující úlohy již byly cílenější.

Druhá úloha kombinovala vyhledání konkrétní lokality s časovým porovnáním proměny jejího okolí. **Třetí úloha** byla založena především na práci s historickým mapovým obsahem a vyžadovala interpretaci dobových mapových podkladů. **Čtvrtá úloha** pak propojovala lokalizační, srovnávací a hodnotící složku, protože participanté měli nejen najít konkrétní objekt a porovnat jeho historickou a současnou podobu, ale také si zapamatovat, který z dostupných režimů porovnávání jim pro daný typ úlohy nejlépe vyhovoval. Konkrétní zadání úloh uvádí **Tabulka 8**.

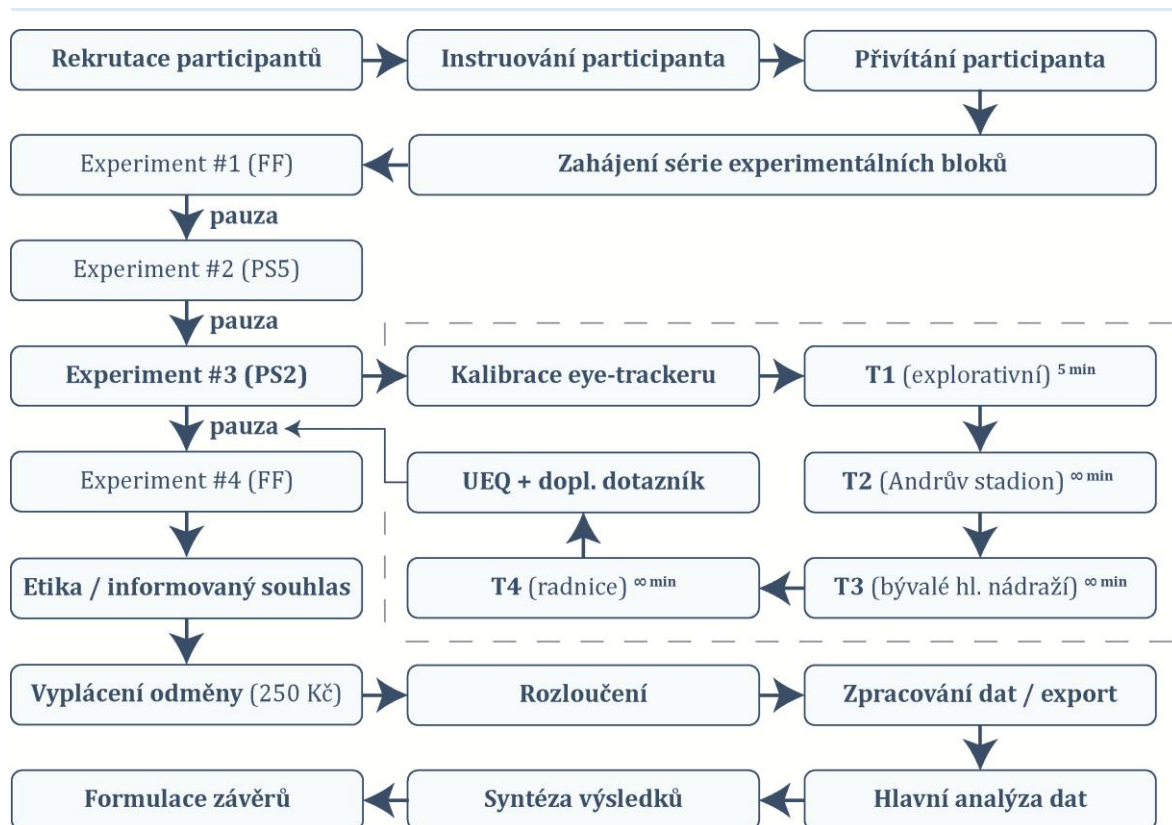
Tabulka 8: Přehled úloh PS2 pro participanty (pořadí úloh bylo pevně dané)

ID úlohy	Typ úlohy	Zadání úlohy	Časový limit
T1	Explorativní	Volná explorace – Po dobu pěti minut volně prozkoumávejte mapovou aplikaci. Můžete prohlížet různé mapové podklady, přibližovat, oddalovat a přepínat zobrazení. Zaměřte se na to, co Vás zaujme, a procházejte aplikaci dle vlastního uvážení.	5 min
T2	Vyhledávací srovnávací	Andrův stadion – Najděte v mapě Andrův fotbalový stadion v Olomouci. Prohlédněte si, jak se stadion a jeho okolí proměnily od roku 1978 do současnosti. Využívejte dostupné mapové vrstvy a historické snímky. Jakmile budete mít dle svého uvážení úkol splněn, stiskněte klávesu F10.	Bez limitu
T3	Vyhledávací interpretační	Bývalé hlavní nádraží – Pomocí historických map najděte místo, kde se nacházelo původní hlavní nádraží v Olomouci v 19. století. Jakmile budete mít dle svého uvážení úkol splněn, stiskněte klávesu F10.	Bez limitu
T4	Vyhledávací srovnávací	Radnice – Najděte olomouckou radnici. Pomocí nástroje Swipe nebo Multiview nebo Overlay porovnejte historickou podobu radnice se současným stavem. Zapamatujte si, který z těchto nástrojů Vám pro tento typ porovnávání nejlépe vyhovuje. Jakmile budete mít dle svého uvážení úkol splněn, stiskněte klávesu F10	Bez limitu

Testování probíhalo v počítačové učebně Filozofické fakulty Univerzity Palackého, kde bylo připraveno **kontrolované laboratorní prostředí** pro současný sběr dat na více pracovních stanicích. Každé pracoviště bylo vybaveno stacionárním eye-trackerem **Tobii Pro Spark** se vzorkovací frekvencí 60 Hz. Toto uspořádání umožnilo paralelní testování až pěti osob v jednom sezení, a zároveň zajistilo jednotné technické podmínky napříč celým sběrem dat. Fotografie testovacího prostředí pořízená přímo během sběru dat je uvedena na **Obrázek 57**.

**Obrázek 57:** Testovací prostředí z průběhu sběru dat.

Samotné testování aplikace nebylo realizováno jako izolovaný experiment, ale jako jedna část širších experimentálních bloků složených ze **čtyř krátkých studií**. Hodnocení aplikace „Proměny Olomouce v čase“ bylo v tomto bloku zařazeno jako třetí v pořadí. Mezi jednotlivými experimenty byla ponechána možnost krátké přestávky, aby se omezilo riziko únavy a zároveň byl zachován plynulý průběh celého testovacího sezení. Finanční odměna ve výši 250 Kč byla poskytována za absolvování celého experimentálního bloku. Celková posloupnost experimentálních bloků a umístění této případové studie v tomto rámci znázorňuje **Obrázek 58**.



Obrázek 58: Schéma průběhu experimentálních bloků se zařazením testovací aplikace.

Před zahájením vlastního plnění úloh byla provedena **kalibrace eye-trackeru**. Po jejím dokončení byly zobrazeny **úvodní instrukce** a následovalo **plnění jednotlivých úloh** v předem stanoveném pořadí (T1 až T4). Úlohy nebyly randomizovány, protože cílem bylo zachovat shodný průběh experimentu pro všechny testované osoby a současně umožnit postupný přechod od volného seznámení s aplikací ke konkrétněji formulovaným úlohám. První explorativní úloha byla časově omezena na **pět minut** a po uplynutí limitu byli participant automaticky přesměrováni na další část experimentu bez zásahu výzkumníka. U zbývajících úloh byl konec řešení ponechán na rozhodnutí participanta; po splnění úlohy podle vlastního uvážení stiskl klávesu F10. Tento postup umožnil jednoznačně oddělit jednotlivé úlohy v eye-tracking záznamech i v navazující analýze interakčních dat.

Po dokončení sady úloh následovala **dotazníková část experimentu**. Ta již nebyla součástí samotného zadání úloh, ale představovala navazující fázi sběru dat, která umožnila propojit behaviorální záznamy s reflexí uživatelské zkušenosti. Z hlediska této podkapitoly je podstatné zejména to, že experimentální průběh byl koncipován jako kombinace standardizovaného laboratorního postupu, úlohově orientovaného testování a následného subjektivního hodnocení za pomoci dotazníku UEQ a doplňkového dotazníku. Tím byl vytvořen datový rámec vhodný pro propojení kvalitativní interpretace eye-tracking záznamů, analýzy logovaných interakcí a dotazníkového hodnocení, které jsou podrobněji rozebrány v navazujících podkapitolách.

7.2.3 Participanti (PS2)

Nábor participantů probíhal prostřednictvím online registrační tabulky, v níž si zájemci rezervovali konkrétní hodinový časový blok. Tento způsob rekrutace umožnil efektivně organizovat sběr dat, rozdělit participanty do jednotlivých testovacích sezení a současně zachovat jednotný průběh experimentálního bloku. Jediným vstupním kritériem byla alespoň základní počítačová gramotnost, odpovídající běžnému používání webových aplikací. Toto kritérium bylo zvoleno záměrně, protože hodnocená aplikace nebyla určena výhradně odborníkům v oblasti kartografie nebo geoinformatiky, ale měla být potenciálně použitelná širší veřejností se základní zkušeností s běžným webovým prostředím.

Studie se zúčastnilo celkem **54 participantů**. Z hlediska pohlaví tvořilo výzkumný vzorek **32 žen a 22 mužů**. Věkové složení bylo výrazně koncentrováno do mladších kategorií, což je nutné zohlednit při interpretaci výsledků. Nejpočetněji byla zastoupena věková skupina **16–24 let**, následovaná skupinou **25–34 let**, zatímco starší věkové kategorie byly zastoupeny pouze v menším počtu. Výsledky této případové studie proto primárně vypovídaly o chování a hodnocení mladších, digitálně zkušenějších uživatelů. Při zobecňování zjištění na širší populaci uživatelů historických mapových portálů, která může zahrnovat také starší osoby, lokální historiky, zájemce o kulturní dědictví nebo uživatele s nižší digitální jistotou, bylo proto nutné postupovat obezřetně.

Účastníkům byla za absolvování celého experimentálního bloku poskytnuta finanční odměna ve výši **250 Kč**. Odměna měla především motivační funkci a přispěla k zajištění dostatečného počtu participantů i jejich plné spolupráce během testování. Po ukončení finálního experimentu každý participant podepsal informovaný souhlas se záznamem dat a jejich následným využitím pro výzkumné účely. Z hlediska této případové studie byl výzkumný vzorek vhodný pro laboratorní, formativně orientované hodnocení uživatelské zkušenosti a interakčního chování při práci s aplikací, nikoliv však pro detailní testování rozdílů mezi věkovými skupinami nebo pro obecné populační závěry.

7.2.4 Analýza dat (PS2)

Analýza dat v této případové studii vycházela z kombinace několika vzájemně se doplňujících zdrojů, které umožnily zachytit jak subjektivní hodnocení aplikace, tak reálné chování uživatelů při práci s interaktivním mapovým rozhraním. Pro záznam očních pohybů byl použit stacionární eye-tracker **Tobii Pro Spark** se vzorkovací frekvencí 60 Hz, který byl součástí testovacího pracoviště v počítačové učebně. Zaznamenaná data však nebyla analyzována pouze jako samostatný eye-tracking výstup, ale byla zasazena do širšího interpretačního rámce zahrnujícího dotazníkové hodnocení, interakční logy a kvalitativní inspekci záznamů. Vyhodnocení proto probíhalo ve čtyřech hlavních rovinách: (i) standardizovaný dotazník **UEQ**, (ii) **doplňkový dotazník**, (iii) **logované interakce** rekonstruované ze změn URL adres a (iv) kvalitativní **inspekce eye-tracking záznamů**. Tento postup umožnil propojit informace o tom, jak uživatelé aplikaci hodnotili, s tím, jak se v ní skutečně pohybovali, jaké nástroje používali a jakým částem rozhraní věnovali vizuální pozornost.

Dotazník UEQ

První část analýzy byla založena na standardizovaném dotazníku **UEQ** (User Experience Questionnaire), který participanty vyplnili bezprostředně po dokončení eye-tracking testování. Cílem tohoto dotazníku bylo kvantitativně zachytit subjektivně vnímanou uživatelskou

zkušenost při práci s aplikací a doplnit tak behaviorální data o systematické hodnocení samotnými uživateli. UEQ byl pro tuto studii vhodný zejména proto, že nepostihuje pouze pragmatické aspekty použitelnosti, jako je srozumitelnost, efektivita nebo spolehlivost, ale také hédonické a emocionální kvality interakce, které jsou u veřejně dostupných mapových portálů významné pro celkové přijetí aplikace.

Do analýzy byla zahrnuta **kompletní sada položek UEQ**, které byly nejprve zkontrolovány z hlediska úplnosti a formální správnosti. Následně byly odpovědi transformovány podle oficiální metodiky UEQ na numerickou škálu v intervalu $(-3; +3)$, kde záporné hodnoty vyjadřovaly negativní hodnocení a kladné hodnoty pozitivní hodnocení systému. Položky byly agregovány do šesti standardních škál: *Atraktivita*, *Přehlednost*, *Účinnost*, *Spolehlivost*, *Stimulace* a *Originalita*. Výsledky byly nejprve vyhodnoceny na úrovni těchto škál, což umožnilo posoudit základní profil uživatelské zkušenosti a odlišit pragmatickou a hédonickou kvalitu systému.

Navazující analýza se zaměřila na **jednotlivé položky dotazníku**. Tento krok byl důležitý proto, že agregované škály mohou zakrývat konkrétní silnější nebo slabší aspekty hodnocení. Vyhodnocení položek proto umožnilo identifikovat, které konkrétní vlastnosti aplikace byly uživateli vnímány nejpozitivněji a u kterých se objevovala větší variabilita odpovědí. Součástí analýzy byly také 95% intervaly spolehlivosti, které sloužily k posouzení přesnosti odhadu průměrných hodnot a stability zjištěných výsledků. Vedle průměrů bylo analyzováno také rozdělení odpovědí, aby bylo možné rozlišit, zda výsledky vyjadřovaly skutečně konzistentní hodnocení napříč participanty, nebo zda byly ovlivněny větší polarizací názorů.

Dalším krokem bylo posouzení **konzistence měřítka**. Vnitřní reliabilita jednotlivých škál byla hodnocena pomocí běžně používaných ukazatelů, zejména Cronbachova alfa a Guttmanova Lambda-2. Tato analýza umožnila ověřit, do jaké míry položky v rámci jednotlivých škál měřily stejný latentní konstrukt a zda bylo možné interpretovat výsledné hodnoty jako dostatečně stabilní. Pro zasazení výsledků do širšího kontextu bylo provedeno také benchmarkové srovnání s referenční databází UEQ. Tím bylo možné posoudit, jak si testovaná aplikace stála ve vztahu k jiným digitálním produktům hodnoceným stejnou metodikou. Součástí kontroly kvality dat byla rovněž analýza nekonzistentních odpovědí, která ověřovala možné známky mechanického nebo nepozorného vyplňování dotazníku. Závěrečným krokem v rámci UEQ bylo orientační posouzení velikosti vzorku, respektive jeho dostatečnosti vzhledem k přesnosti odhadu průměrných hodnot jednotlivých škál.

Doplňkový dotazník

Druhou část dotazníkového šetření tvořil **doplňkový dotazník**, který byl zaměřen na **demografické charakteristiky**, předchozí **zkušenosti participantů** a jejich **subjektivní reflexi** práce s aplikací. Jeho úkolem nebylo nahradit standardizované hodnocení UEQ, ale doplnit jej o interpretační kontext, který umožnil lépe porozumět rozdílům mezi uživateli a jejich strategiím při řešení úloh. Zatímco UEQ poskytl strukturované a standardizované měření uživatelské zkušenosti, doplňkový dotazník umožnil zachytit faktory, které mohly ovlivňovat práci s mapovou aplikací, ale nejsou přímo součástí standardních škál UEQ.

Analýza doplňkového dotazníku byla členěna do několika tematických okruhů. Nejprve byly vyhodnoceny základní charakteristiky participantů, zejména pohlaví, a dále deklarovaná obecná počítačová gramotnost. Následně byly analyzovány zkušenosti s používáním online map a zkušenosti s historickými mapami, protože právě tyto proměnné mohly ovlivnit

schopnost orientovat se v mapovém rozhraní, interpretovat historický obsah a volit vhodné srovnávací nástroje. Samostatně byla sledována také znalost Olomouce, která představovala významný kontextový faktor vzhledem k tomu, že testované úlohy byly založeny na vyhledávání a interpretaci konkrétních lokalit ve městě.

Další část analýzy se zaměřila na **subjektivně preferovanou vizualizační metodu**. Participantů po dokončení úloh uváděli, který způsob porovnávání map jim pro práci s aplikací nejvíce vyhovoval. Tato informace byla následně interpretována ve vazbě na logované interakce a kvalitativní inspekci eye-tracking záznamů, protože deklarovaná preference nemusela vždy odpovídat skutečně používaným strategiím během experimentu. V doplňkovém dotazníku byly dále analyzovány návrhy participantů na **zlepšení aplikace, problémy a nejasnosti** zaznamenané během testování a také tendence k **použití aplikace znovu** v budoucnu. Tyto odpovědi poskytly důležitý podklad pro interpretační propojení měřených dat s uživatelskou reflexí a zároveň umožnily identifikovat konkrétní aspekty rozhraní vhodné pro další vývoj aplikace.

Logované interakce

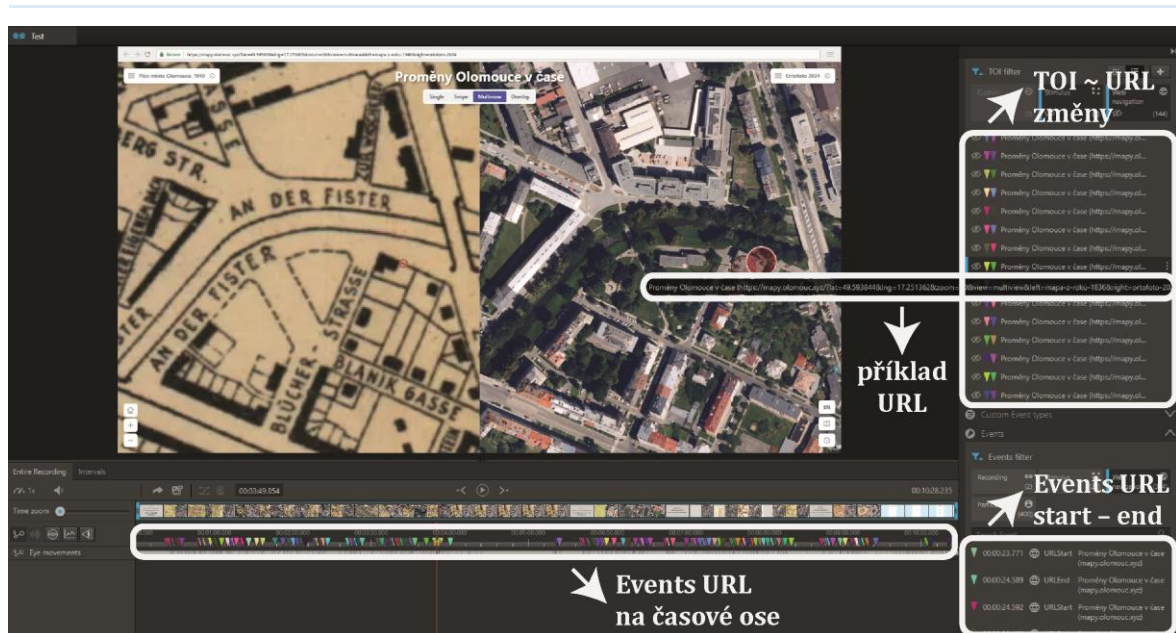
Třetí analytickou rovinu představovaly **logované interakce**. Ty nebyly získány prostřednictvím samostatně implementovaného logovacího nástroje, ale byly rekonstruovány **ze změn URL adres** zaznamenaných v prostředí **Tobii Pro Lab**. Každá úloha byla spouštěna z výchozího stavu aplikace a probíhala v interním prohlížeči softwaru Tobii, který kromě záznamu očních pohybů umožnil zachytit také změny URL adresy. Protože URL adresa aplikace obsahovala parametry popisující aktuální stav zobrazení (**Obrázek 59**), bylo možné z těchto změn odvodit konkrétní interakční kroky uživatelů, například změnu mapového podkladu, posun mapy, změnu přiblížení nebo přepnutí vizualizační metody.

https://mapy.olomouc.xyz/?lat=49.594872&lng=17.255901&zoom=18&view=swipe&left=mapa-z-roku-1836&right=ortofoto-2024				
geografické souřadnice	úroveň zoomu	vizualizační metoda	zobrazená mapa v levém okně	zobrazená mapa v pravém okně

Obrázek 59: Příklad struktury URL adresy aplikace „Proměny Olomouce v čase“.

Získání logovaných interakcí z prostředí Tobii Pro Lab nebylo zcela přímočaré, protože interakční data jsou v tomto softwaru navázána přímo na videozáznam očních pohybů ve formě událostí (*events*) a následně agregována do časových úseků typu TOI (**Obrázek 60**). Tato data jsou primárně určena pro prohlížení a interpretaci v rámci uzavřeného prostředí Tobii Pro Lab, nikoliv pro okamžitý export do podoby analyticky připravené tabulky. Přesto bylo možné je prostřednictvím TOI exportovat do formátu CSV. Tím byla pro každý záznam každého participanta získána sekvence URL adres doplněná o délku příslušného časového intervalu a časovou značku začátku dané URL. Exportovaná TOI data byla následně importována do prostředí Microsoft Excel, kde bylo nutné je dále předzpracovat. Protože každá URL adresa obsahovala v jedné buňce více parametrů popisujících aktuální stav aplikace, byly tyto parametry postupně extrahovány pomocí textových funkcí a rozděleny do samostatných sloupců. Výsledná tabulka tak obsahovala klíčové informace o aktuálním stavu mapového rozhraní, zejména geografické souřadnice středu zobrazení (Lat, Lon), úroveň přiblížení, použitou komparační metodu a identifikaci mapového podkladu zobrazeného vlevo a vpravo.

Takto připravený datový soubor již umožnil analýzu logovaných interakcí, respektive analytické vytěžení změn URL adres jako záznamu reálného průchodu uživatelů aplikací.



Obrázek 60: Ukázka záznamu URL událostí v prostředí Tobii Pro Lab využitých pro rekonstrukci logovaných interakcí uživatelů s aplikací „Proměny Olomouce v čase“.

Analýza logovaných interakcí byla zaměřena na rekonstrukci reálného průběhu práce s aplikací. Nejprve byl sledován **poměr dvou současně zobrazených map**, tedy jaké typy mapových podkladů uživatelé kombinovali při práci v režimech umožňujících paralelní srovnání. Tento ukazatel pomohl určit, zda participanti častěji porovnávali historické mapy se současným ortofotem, dvě ortofota mezi sebou, nebo dvě historické mapy. Dále byla analyzována doba využívání konkrétních mapových podkladů, což umožnilo identifikovat, které vrstvy plnily během řešení úloh roli hlavních referenčních nebo interpretačních zdrojů. Samostatná analýza byla věnována **kombinaci typu vizualizační metody a mapového podkladu**. Tento krok byl důležitý proto, že jednotlivé režimy zobrazení neměly stejnou funkci ve všech typech úloh a jejich význam se měnil podle toho, zda uživatelé porovnávali historickou mapu se současným stavem, dvě ortofota, nebo pracovali převážně s jedním historickým podkladem. Dále byla vyhodnocena doba využívání konkrétních vizualizačních metod, tedy režimů Single, Swipe, Multiview a Overlay. Tato analýza umožnila posoudit, které režimy byly v praxi skutečně používány a jak se jejich využití lišilo mezi úlohami.

Součástí analýzy logů byla rovněž **doba řešení jednotlivých úloh**. Tento ukazatel poskytl základní informaci o časové náročnosti úloh a o rozdílech mezi volnou explorací a cíleněji formulovanými úkoly. Poslední část byla zaměřena na analýzu zoomu, tedy na to, jakou úroveň přiblížení participanti používali při orientaci v mapě, vyhledávání lokalit a detailním porovnávání mapových podkladů. Logované interakce tak představovaly důležitý mezistupeň mezi subjektivním hodnocením a eye-tracking daty, protože umožnily interpretovat vizuální pozornost ve vztahu ke konkrétním akcím prováděným v aplikaci.

Kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů

Čtvrtou částí analýzy byla **kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů**. V této studii nebyly aplikovány pokročilé kvantitativní eye-tracking postupy, jako je výpočet metrik fixací v předem definovaných AOI, statistické porovnávání mezi skupinami nebo analýza sekvencí fixací. Hlavním důvodem byla vysoká dynamika a heterogenita práce s aplikací. Každý participant mohl pracovat s jiným výřezem mapy, odlišnou úrovní přiblížení, jinou kombinací mapových vrstev a jiným režimem zobrazení. V takto proměnlivém prostředí by standardizace oblastí zájmu napříč participanty a úlohami byla metodicky problematická a výsledné metriky by bylo obtížné interpretovat.

Kvalitativní inspekce byla proto zvolena jako **vhodnější analytický postup** pro zachycení strategií práce s aplikací, momentů nejistoty, sekvencí rozhodování a případných problémů při objevování nebo používání ovládacích prvků. Záznamy byly analyzovány po jednotlivých úlohách. V úloze 1 byla pozornost věnována především spontánnímu objevování rozhraní, prvotní orientaci v mapovém prostředí, tomu, zda uživatelé nacházeli dostupné režimy zobrazení, a jakým způsobem si vytvářeli představu o funkční logice aplikace. V úloze 2 byla inspekce zaměřena na postup při vyhledání Androva stadionu a na způsob, jakým participant vizuálně porovnávali změny v jeho okolí mezi historickým a současným stavem. V úloze 3 bylo sledováno zejména čtení historického mapového obsahu, práci s dobovými kartografickými znaky a strategii hledání bývalého hlavního nádraží. V úloze 4 byla pozornost zaměřena na porovnávání historické a současné podoby radnice a na volbu nástroje, který uživatelé považovali za nejvhodnější pro daný typ srovnání.

Vedle analýzy jednotlivých úloh byly vyhodnoceny také **opakující se vzorce napříč úlohami**. Tyto vzorce se týkaly zejména způsobu, jakým uživatelé střídali mapový obsah a ovládací prvky, jak často se vraceli k výběru vrstev, jak pracovali se současným ortofotem jako referenčním podkladem a v jakých situacích docházelo k váhání nebo nejistotě. Právě propojení kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů s logovanými interakcemi bylo pro tuto případovou studii podstatné. Logy poskytovaly informaci o tom, jaké kroky uživatelé v aplikaci provedli, zatímco eye-tracking záznamy umožnily interpretovat, jak těmto krokům předcházela vizuální pozornost, orientace v rozhraní a rozhodování během práce s mapou. Výsledkem byl ucelenější obraz používání aplikace, než jaký by poskytla pouze jedna z použitých metod.

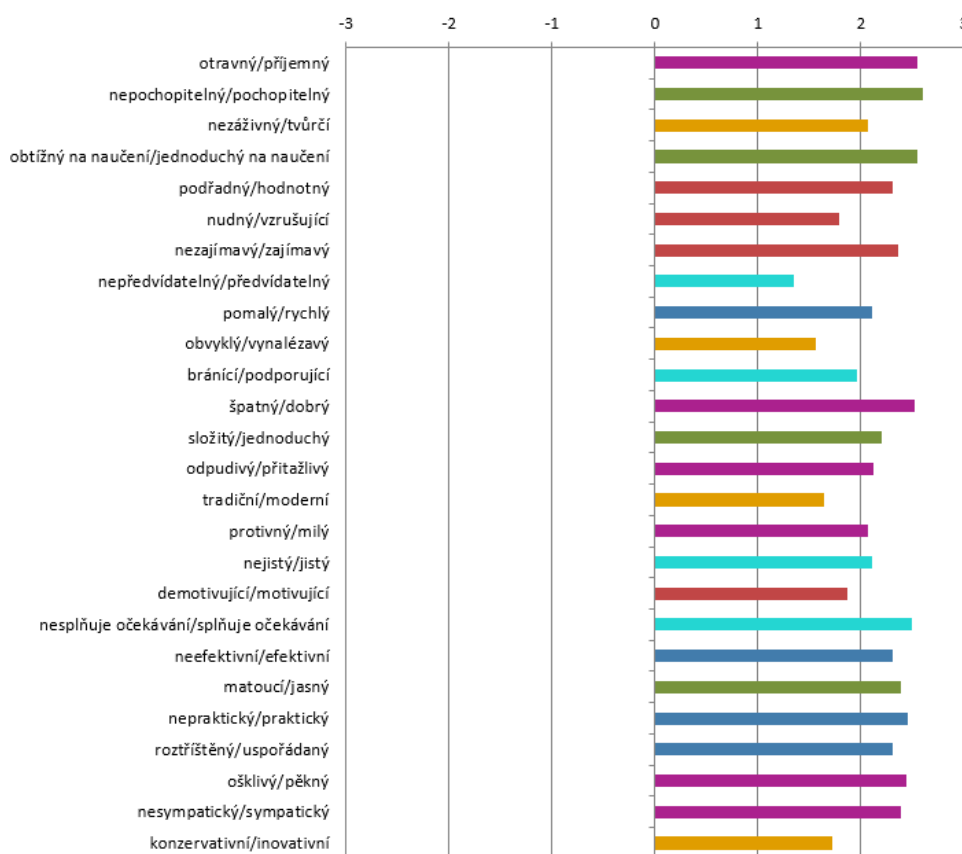
Metriky použitelnosti

Z hlediska hodnocení použitelnosti bylo podstatné, že studie nesledovala pouze obecné uživatelské dojmy, ale pracovala také s metrikami odpovídajícími základní triádě použitelnosti: **efektivnost**, **účinnost** a **spokojenost**. V rámci této případové studie byla efektivnost operacionalizována prostřednictvím **času řešení úloh**, účinnost prostřednictvím **úspěšnosti řešení cílených úloh** a spokojenost prostřednictvím standardizovaného **dotazníku UEQ**. Vzhledem k explorativní povaze první úlohy nebyla úloha hodnocena z hlediska správnosti řešení, protože sloužila primárně k seznámení s rozhraním. U cílených úloh 2–4 však byla výkonnost hodnocena dvojím způsobem – zaprvé pomocí času dokončení úlohy, měřeného do okamžiku stisknutí klávesy F10 a zadruhé prostřednictvím dodatečného kategoriálního kódování výsledku řešení jako úspěšné, částečně úspěšné nebo neúspěšné. Toto kódování vycházelo z kontroly záznamu průběhu úlohy a reflektovalo, zda participant dosáhl

hlavního cíle zadání, například zda lokalizoval požadované místo a provedl požadované porovnání.

7.2.5 Hlavní zjištění (PS2)

Druhá případová studie ověřila použitelnost a uživatelskou zkušenost aplikace „Proměny Olomouce v čase“ prostřednictvím kombinace (i) standardizovaného **dotazníku UEQ**, (ii) **doplňkového dotazníku**, (iii) **logovaných interakcí** rekonstruovaných ze změn URL adres a (iv) kvalitativní **inspekce eye-tracking záznamů**. Tato kombinace se ukázala jako vhodná zejména proto, že hodnocená aplikace představovala komplexnější IKV než mapy analyzované v PS1. Uživatelé zde nepracovali pouze s jedním mapovým rozhraním, ale s proměnlivou kombinací mapových vrstev, režimů zobrazení, zoomu, prostorového výřezu a vlastních strategií porovnávání. Výsledky proto nebyly interpretovány pouze jako izolované hodnocení jednoho produktu, ale také jako metodologický příklad toho, jak lze u dynamických webových map kombinovat subjektivní hodnocení, behaviorální logy a kvalitativní eye-tracking interpretaci. Z hlediska subjektivně vnímané uživatelské zkušenosti byly výsledky velmi pozitivní. V dotazníku UEQ dosáhly všechny sledované dimenze **kladných hodnot** a žádná z 26 položek neklesla do neutrálního nebo negativního pásma (**Obrázek 61**).

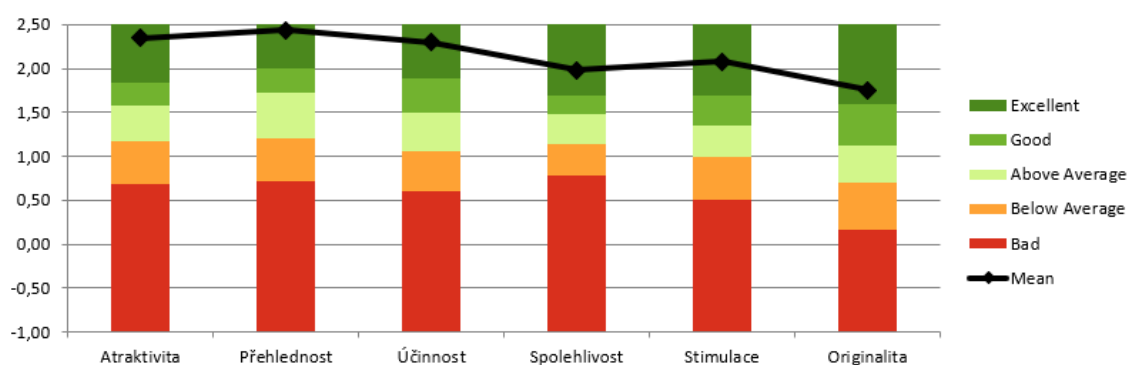


Obrázek 61: Průměrné hodnoty všech 26 položek UEQ.

Nejvyšší hodnotu měla škála *Atraktivita* ($M = 2,35$), která vystihovala celkový pozitivní dojem z aplikace. Velmi vysoko byly hodnoceny také pragmatické aspekty práce s rozhraním: *Přehlednost* dosáhla hodnoty $M = 2,43$, *Účinnost* $M = 2,30$ a *Spolehlivost* $M = 1,98$. Agregovaná

pragmatická kvalita dosáhla hodnoty 2,23, zatímco **hédonická kvalita** hodnoty 1,92. Z hédonických škál byla výše hodnocena *Stimulace* ($M = 2,08$) než *Originalita* ($M = 1,75$), což naznačuje, že aplikace byla vnímána spíše jako srozumitelný, funkční a příjemný nástroj než jako výrazně inovativní rozhraní.

Stabilitu těchto výsledků podpořily také intervaly spolehlivosti a benchmarkové srovnání. **Intervaly spolehlivosti** byly u klíčových škál relativně úzké a celé se nacházely v pozitivní části škály, například u *Atraktivity* $CI = \langle 2,203; 2,494 \rangle$, u *Přehlednosti* $CI = \langle 2,279; 2,585 \rangle$ a u *Účinnosti* $CI = \langle 2,149; 2,442 \rangle$. Největší variabilita se objevila u *Originality*, kde byl interval $CI = \langle 1,512; 1,988 \rangle$, avšak i zde zůstal výsledek jednoznačně pozitivní. V benchmarkovém srovnání s referenční databází UEQ obsahující 21 175 respondentů ze 468 studií se všech šest škál zařadilo do kategorie **Excellent**, tedy mezi přibližně 10 % nejlépe hodnocených systémů (**Obrázek 62**). Současně nebyl identifikován žádný respondent splňující kritéria pro vyřazení kvůli nekonzistentním odpovědím, takže do analýzy mohl být zahrnut kompletní datový soubor.



Obrázek 62: Průměrné hodnoty všech šesti škál vůči referenční databázi UEQ.

Doplňkový dotazník pomohl zasadit výsledky UEQ do uživatelského kontextu. Vzorek byl tvořen převážně uživateli se **střední až vysokou počítačovou gramotností**: střední úroveň uvedlo 26 participantů (48,2 %), vysokou 15 participantů (27,8 %) a velmi vysokou 11 participantů (20,4 %), zatímco nízkou nebo velmi nízkou úroveň uvedli pouze dva respondenti (3,6 %). Podobně vysoká byla **zkušenost s běžnými online mapami**: velmi často je používalo 25 participantů (46,3 %) a často dalších 23 participantů (42,6 %). Naopak **zkušenost s historickými mapami** byla slabší a heterogennější: základní zkušenost uvedlo 25 participantů (46,3 %), žádnou zkušenost 12 participantů (22,2 %), střední zkušenost 11 participantů (20,4 %) a pokročilou zkušenost pouze 6 participantů (11,1 %). To naznačuje, že případné bariéry při práci s aplikací nelze vysvětlovat nedostatkem obecné digitální nebo mapové zkušenosti, ale spíše specifičností historických map, lokální znalostí Olomouce a objevitelností konkrétních funkcí rozhraní.

Významnou roli hrála **znalost města Olomouce**. Nejčastěji byla uváděna částečná znalost města ($n = 24$; 44,4 %), následovaná dobrou znalostí ($n = 15$; 27,8 %) a spíše nízkou znalostí ($n = 10$; 18,5 %). Velmi dobrou znalost deklarovali pouze 4 participanté (7,4 %) a žádnou znalost 1 participant (1,8 %). Právě nižší lokální znalost se opakovaně promítala do problémů při úlohách zaměřených na konkrétní objekty, zejména při lokalizaci stadionu, radnice nebo dalších orientačních bodů. S tím souvisely pak i finální návrhy na doplnění popisů budov,

seznamu populárních míst anebo umožnění vyhledávání lokalit. Přesto byla deklarovaná ochota aplikaci **znovu použít jednoznačně pozitivní**: 44 participantů (81,5 %) odpovědělo „rozhodně ano“ a zbývajících 10 participantů (18,5 %) „spíše ano“, zatímco negativní odpověď se nevyskytla.

Preference vizualizačních metod ukázaly jednoznačnou **dominanci režimu Swipe**. Ten jako nejvíce vyhovující metodu uvedlo 31 participantů (57,4 %), zatímco Multiview preferovalo 18 participantů (33,3 %) a Overlay pouze 5 participantů (9,3 %). Tento výsledek odpovídá jak subjektivnímu hodnocení, tak logovaným interakcím. U participantů s dobrou nebo velmi dobrou znalostí Olomouce **převažoval Swipe ještě výrazněji** (n = 14; 73,7 %), zatímco u osob se slabší znalostí města byla **častější preference Multiview** (n = 6; 54,6 %). Podobný vztah se projevil také u zkušenosti s historickými mapami: uživatelé s alespoň střední nebo pokročilou zkušeností volili téměř rovnoměrně Multiview (52,9 %) a Swipe (47,1 %), zatímco u méně zkušených uživatelů převažoval Swipe (62,2 %). To naznačuje, že Swipe byl obecně nejsrozumitelnější a nejpřímochařejší režim, zatímco Multiview mohl být atraktivnější pro uživatele schopné paralelně interpretovat více mapových stavů.

Logované interakce poskytly objektivnější obraz skutečného používání aplikace. Ve stavech se dvěma současně zobrazenými mapami výrazně dominovala kombinace *Historical + Orthophoto*, která představovala 63,09 % celkového času v dvoumapových režimech (20 286,5 s). Druhou nejčastější konfigurací byla *Orthophoto + Orthophoto* s podílem 32,79 % (10 541,9 s), zatímco *Historical + Historical* byla využívána pouze okrajově (4,12 %; 1 324,4 s). Uživatelé tedy obvykle nepoužívali dvě historické mapy proti sobě, ale historický podklad vztahovali k současnému ortofotu jako referenčnímu stavu. Tento vzorec je tak interpretačně významný, kdy současné ortofoto fungovalo jako prostorová kotva, zatímco historická mapa sloužila jako zdroj informace o proměně území.

Časová analýza jednotlivých mapových vrstev tento závěr dále potvrdila. Nejvyužívanějším podkladem bylo **ortofoto z roku 2024**, které tvořilo 29 854,0 s, tedy přibližně 43,6 % veškerého „map-time“. Druhou nejpoužívanější vrstvou byla **historická mapa z roku 1836** s hodnotou 11 683,3 s, tedy přibližně 17,1 %. Třetí nejčastější vrstvou bylo **ortofoto z roku 1978** s hodnotou 2 254,6 s, tedy přibližně 3,3 %. Prvních deset nejpoužívanějších map pokrývalo přibližně 74,6 % celkového času, což ukazuje, že práce participantů byla silně soustředěna na několik klíčových referenčních podkladů. Tento výsledek byl částečně ovlivněn výchozím nastavením aplikace a zadáním úloh, ale současně ukazuje, že uživatelé si při práci s rozsáhlým souborem vrstev rychle vytvořili omezený soubor pracovních map, k nimž se opakovaně vraceli.

Také analýza kombinací vizualizačních metod a mapových vrstev potvrdila dominantní roli režimu **Swipe**. Největší podíl tvořila kombinace *Swipe + ortofoto 2024* (18 458,0 s; přibližně 27,0 % celkového „type-map time“), následovaná kombinací *Swipe + mapa 1836* (8 172,1 s; přibližně 11,9 %). Mezi další výrazné konfigurace patřily *Multiview + ortofoto 2024* (6 896,2 s; přibližně 10,1 %) a *Overlay + ortofoto 2024* (4 061,6 s; přibližně 5,9 %). Tyto čtyři konfigurace dohromady pokryly přibližně 55 % celkového času, což dokládá, že skutečné používání aplikace nebylo rozptýlené rovnoměrně mezi všechny možné kombinace vrstev a metod, ale koncentrovalo se do několika stabilních pracovních konfigurací. V souhrnu podle vizualizační metody tvořil Swipe 19 903,1 s, tedy 54,78 % celkového „type-time“, následovaný Multiview (7 823,3 s; 21,53 %), Overlay (4 426,5 s; 12,18 %) a Single (2 923,7 s; 8,05 %).

Čas řešení úloh ukázal postupné zkracování práce s aplikací. Nejdelší byla úvodní explorativní úloha s průměrem přibližně 275,2 s, tedy 4 min 35 s, následovaná úlohou 2 s průměrem 187,1 s, úlohou 3 s průměrem 119,0 s a úlohou 4 s průměrem 95,4 s. Tento trend odpovídá efektu učení, kdy po počáteční orientaci v rozhraní byli participanti schopni v dalších úlohách pracovat cíleněji a s menší mírou explorační. Současně se projevovala výrazná individuální variabilita, zejména u úlohy 2, kde minimální čas 5,9 s pravděpodobně představoval artefakt nebo předčasné ukončení, zatímco maximální čas 805,6 s ukazoval na velmi pomalou či detailně explorativní strategii. Navíc se ale ukázalo, že kratší čas řešení neznamenal automaticky vyšší úspěšnost. Kategoriální vyhodnocení cílených úloh ukázalo výrazné rozdíly v jejich obtížnosti. V úloze 2 bylo jako úspěšné vyhodnoceno 30 z 53 validních případů (56,6 %), 5 případů (9,4 %) bylo částečně úspěšných a 18 případů (34,0 %) neúspěšných. **V úloze 3** bylo úspěšných pouze 7 z 53 participantů (13,2 %), 5 případů (9,4 %) bylo částečně úspěšných a **41 případů (77,4 %) neúspěšných**, což z této úlohy činilo jednoznačně nejnáročnější část testování. V úloze 4 bylo úspěšných 29 z 53 participantů (54,7 %), 15 případů (28,3 %) částečně úspěšných a 9 případů (17,0 %) neúspěšných. Tyto výsledky však prokázaly, že hlavní bariérou nebylo samotné časové porovnávání map, ale především lokalizace požadovaných objektů.

Analýza zoomu ukázala, že uživatelé pracovali převážně v relativně stabilním pracovním měřítku, kdy se zoom pohyboval v rozmezí 10–20, medián byl 16, průměr 16,12, časově vážený průměr 16,01 a směrodatná odchylka přibližně 1,66. V průběhu úloh se přitom projevoval posun k detailnějším měřítkům, protože časově vážený průměr zoomu vzrostl z 15,31 v úloze 1 na 16,65 v úloze 2 a 17,16 v úloze 4.

Kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů doplnila numerická zjištění o interpretační rovinu. V úvodní explorativní úloze se objevovalo střídání delších epizod soustředění na mapové pole s krátkými návraty k ovládacím prvkům. Někteří participanti aktivně testovali různé režimy zobrazení, jiní se soustředili především na obsah mapy a ovládací prvky navštěvovali pouze účelově. Menší část zůstávala převážně u výchozího režimu Swipe a věnovala se hlavně posunu a změnám měřítka. Právě úvodní explorace zároveň odhalila několik bariér: někteří uživatelé se při výrazném posunu nebo oddálení dostali **mimo očekávaný prostor Olomouce** a delší dobu hledali návrat do relevantního území; **prvek Storymapa** byl v některých případech mylně interpretován jako navigační nebo vyhledávací nástroj a jeho otevření vedlo k dočasné dezorientaci.

V cílených úlohách byly strategie stabilnější. U úlohy 2 většina participantů používala aktuální ortofoto jako prostorovou kotvu a následně přecházela k historickému ortofotu z roku 1978. Typická strategie spočívala buď v postupném „krokování“ do minulosti, nebo v přímém kontrastu dvou časových řezů. U úlohy 3 byla práce nejvíce kartograficky orientovaná, protože bylo nutné dekódovat historický mapový obsah, identifikovat železniční infrastrukturu a propojit ji se současným prostorem. V záznamech se opakoval postup „nejprve výběr vhodného historického podkladu, poté jeho dekódování“; u části participantů fungoval jako jednoznačný orientační bod nápis „Bahnhof“. U úlohy 4 se projevilo aktivní testování více nástrojů a formování uživatelských preferencí, avšak někteří participanti nedostatečně reflektovali druhou, hodnotící část zadání, tedy výběr nejvhodnější metody. Napříč úlohami se potvrdilo, že hlavní část vizuální pozornosti směřovala do mapového okna, zatímco ovládací

prvky byly navštěvovány krátce a účelově. To zvyšuje nároky na jejich zřetelnost, popisnost a snadnou dohledatelnost.

Z hlediska **návrhů na vylepšení produktu** lze identifikovaná doporučení rozdělit do několika oblastí. První oblastí byla **prostorová navigace**: vhodné by bylo omezit rozsah posunu a přiblížení na relevantní území Olomouce, doplnit výraznější tlačítko pro návrat do výchozího zobrazení a posílit orientační podporu pro uživatele bez lokální znalosti města. Druhou oblastí byla **objevitelnost ovládacích prvků**, zejména jasnější označení funkce Storymapa, výraznější prvky pro změnu mapového podkladu a doplnění vysvětlujících popisků nebo krátké nápovědy. Třetí oblastí byla **práce s mapovými podklady**: výsledky podporují doplnění vyhledávání lokalit, seznamu významných míst, popisek budov a případně doplnění legend do historických map, které by snížily kognitivní zátěž při interpretaci dobových kartografických znaků. Čtvrtou oblastí byla **technická stránka aplikace**, zejména rychlost načítání dlaždic, zřetelné odlišení situací, kdy se data teprve načítají, od situací, kdy pro dané území nejsou dostupná, a sjednocení nebo lepší komunikace prostorového rozsahu jednotlivých vrstev. Vhodné by bylo také doplnit filtraci nebo řazení map podle roku, případně časový slider, který by uživatelům umožnil rychleji vybírat relevantní období.

Význam PS2 pro tuto disertační práci spočíval především v ověření metodického postupu pro hodnocení komplexnějších IKV. Studie ukázala, že u dynamické mapové aplikace s proměnlivým obsahem nemusí být standardní kvantitativní AOI analýza vždy nejvhodnějším řešením, protože stejná pozice na obrazovce může v různých okamžicích reprezentovat odlišný geografický obsah, jiný mapový podklad nebo jiný stav rozhraní. Kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů se v kombinaci s logovanými interakcemi ukázala jako metodicky přiměřený způsob, jak interpretovat vizuální pozornost ve vztahu ke skutečnému chování uživatelů. Zároveň se potvrdila přidaná hodnota standardizovaného dotazníku UEQ, který umožnil zasadit pozorované interakční strategie do širšího rámce subjektivně vnímané uživatelské zkušenosti. PS2 tak posunula metodický rámec disertace od relativně jednodušších interaktivních map v PS1 k hodnocení složitějšího mapového prostředí, v němž bylo nutné kombinovat kvalitativní interpretaci, interakční logy a standardizované UX měření. Tato případová studie proto představovala důležitý mezičlánek v postupném naplňování DC3 a současně potvrdila, že hodnocení IKV metodou eye-tracking má být vždy přizpůsobeno míře dynamiky, interaktivity a analytické komplexity konkrétního mapového rozhraní.

Veškerá podkladová data pro PS2 jsou k dispozici v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP a dále na datovém úložišti disertační práce (viz kapitola Přílohy).

PS3

7.3 Interaktivní atlas a jeho statická varianta (PS3)

Hodnocený produkt	interaktivní atlas <i>Mapy.cz</i> ; statický <i>Školní atlas světa Kartografie Praha</i>
Základní metody	eye-tracking (mozaika, asistované a schematické mapování fixací), logování interakcí (<i>CartoLogger</i> , <i>MapLogger</i> , <i>custom events</i>)
Použité zařízení	Tobii Pro Spectrum (stacionární), Tobii Glasses 3 (mobilní)
Hlavní nástroje	Tobii Pro Lab, Affinity
Počet úloh	8 (+ 1× trénovací)
Počet participantů	47

Tato případová studie (PS3) se zaměřovala na analýzu práce participantů s **interaktivním atlasem a jeho statickou variantou**, přičemž hlavní pozornost nebyla soustředěna pouze na samotné hodnocení kartografického produktu, ale především na **metodologické možnosti zpracování eye-tracking dat** v podmínkách komplexnějších kartografických stimulů. Oproti předchozím případovým studiím PS1 a PS2 zde byl analyzován ještě náročnější typ IKV, u níž se vizuální obsah v průběhu řešení úloh měnil v závislosti na uživatelské interakci, zvoleném měřítku, posunu mapy, přepínání vrstev či dalších ovládacích prvcích. Současně byla do studie zahrnuta také statická varianta atlasu, která umožnila porovnat odlišné metodologické přístupy k analýze uživatelského chování u dynamického a statického kartografického stimulu. Studie tak navazovala na předchozí dílčí zjištění disertační práce a dále rozvíjela otázku, jakým způsobem lze eye-tracking využít ve studiích zaměřených na kartografické produkty, které svou povahou překračují možnosti standardní analýzy nad jedním neměnným vizuálním podnětem. Z metodologického hlediska bylo cílem této případové studie zejména otestovat **možnosti asistovaného mapování fixací** do statického snímku, tedy postupu popsáno v teoreticko-metodologické části práce v podkapitole 6.2.1. Tento postup představoval potenciální řešení situací, kdy není možné eye-tracking data jednoduše vyhodnotit pouze v původních souřadnicích obrazovky nebo scény, protože význam jednotlivých míst pohledu se měnil podle aktuálního zobrazení atlasu. S tím souvisely také výzvy spojené s využitím mobilních eye-tracking brýlí v real-world prostředí, zejména přesnost záznamu, prostorová lokalizace pohledu a návaznost fixací na konkrétní obsah atlasu.

Studie byla realizována ve spolupráci s širším autorským kolektivem vedeným dr. Markétou Beitlovou, Ph.D., přičemž na její odborné koncepci a průběhu se podílel také školitel disertační práce doc. RNDr. Stanislav Popelka, Ph.D. Autor disertační práce byl aktivně přítomen u všech klíčových fází studie, od sběru dat až po jejich následné zpracování, přičemž hlavní těžiště jeho vlastního přínosu spočívalo právě v analytické části, tedy v návrhu, ověření a reflexi postupů pro práci s eye-tracking daty v kontextu interaktivního atlasu a jeho statické varianty.

Metodologická část PS3 byla publikována jako článek v konferenčním sborníku: **Vaníček, T.**, Beitlova, M., Vojtechovska, M., Popelka, S. (2024) Exploring Methods for Evaluation of Dynamic and Interactive Maps, 9th International Conference on Cartography & GIS, Nessebar, Bulgaria.

Metodologická část PS3 byla autorem představena v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T.**, Beitlová, M., Vojtěchovská, M., Popelka, S. (2024). Investigating Evaluation Techniques for Dynamic and Interactive Cartographic Stimuli. Olomouc: 22nd Cognition and Artificial Life Conference (CAL). In *Proceedings of Cognition and Artificial Life 2024*, Fort Science Olomouc, s. 72. ISBN 978-80-88123-36-1 (online).

Metodologická část PS3 byla také autorem představena v rámci konferenčního příspěvku: **Vaníček, T.**, Beitlová, M., Vojtěchovská, M., Popelka, S. (2024). Exploring Methods for Evaluation of Dynamic and Interactive Maps. Nessebar, Bulgaria: 9th International Conference on Cartography & GIS. In *E-Proceedings of 9th Conference on Cartography and GIS*. ISSN 1314-0604.

Konceptuální část PS3 byla představena v rámci konferenčního příspěvku: Beitlová, M., Gartner, G., **Vaníček, T.**, Vojtěchovská, M., Joukl, Z., Popelka, S. (2024). Exploring methods for revealing the cognitive structures of map information extraction. Abstr. Int. Cartogr. Assoc, 7, 11. Vídeň, Rakousko: EuroCarto 2024, <https://doi.org/10.5194/ica-abs-7-11-2024>.

7.3.1 Hodnocený produkt (PS3)

V rámci této případové studie (PS3) byly jako stimuly využity dva tematicky srovnatelné, avšak z hlediska formy a způsobu uživatelské interakce výrazně odlišné kartografické produkty – **statický atlas** a **interaktivní atlas (Obrázek 63)**. Statickou variantu reprezentoval tištěný **Školní atlas světa** vydaný společností **Kartografie Praha**, zatímco interaktivní variantu představoval webový atlas dostupný prostřednictvím platformy **Mapy.cz**⁴⁰. Oba produkty byly do designu experimentu zařazeny jako primární vizuální stimuly, nad nimiž byly řešeny vybrané mapové úlohy. Pro jednotlivé úlohy byly zvoleny konkrétní tematické okruhy a mapové výřezy tak, aby bylo možné sledovat práci uživatelů se srovnatelným kartografickým obsahem, avšak v rozdílných podmínkách jeho prezentace. Zatímco statický atlas představoval stabilní vizuální podnět s předem daným rozsahem, měřítkem, kompozicí a rozvržením mapových prvků, interaktivní atlas umožňoval uživateli aktivně měnit podobu zobrazeného kartografického obsahu. Právě tato kombinace vytvořila vhodný základ pro porovnání analytických postupů při zpracování eye-tracking dat nad statickým a dynamickým kartografickým stimulem.

⁴⁰ **Mapy.cz**. Atlas [online]. [b.r.]. Praha: Seznam.cz, a.s.
Dostupné z: <https://atlas.mapy.cz> [cit. 19. 3. 2026].



Obrázek 63: Náhled na obsah hodnocených produktů – interaktivní (nahore) a statický (dole) atlas.

Statický atlas byl z hlediska analýzy charakteristický tím, že jeho obsah zůstával v průběhu řešení úlohy neměnný. Uživatel pracoval s pevně vymezenou mapovou kompozicí, v níž se poloha jednotlivých mapových prvků, legendy, popisů či tematických vrstev v čase neměnila. Tento typ stimulu proto umožňoval relativně přímočaré vztažení zaznamenaných fixací ke konkrétním částem mapového obrazu. Současně však práce s tištěným atlasem v real-world experimentálním prostředí přinášela i vlastní metodologické komplikace, zejména ve vztahu k využití **mobilních eye-tracking brýlí**. Záznam pohledu byl vázán na záznam scény, v níž se měnila poloha hlavy, vzdálenost uživatele od atlasu, úhel pohledu i přesná pozice sledované

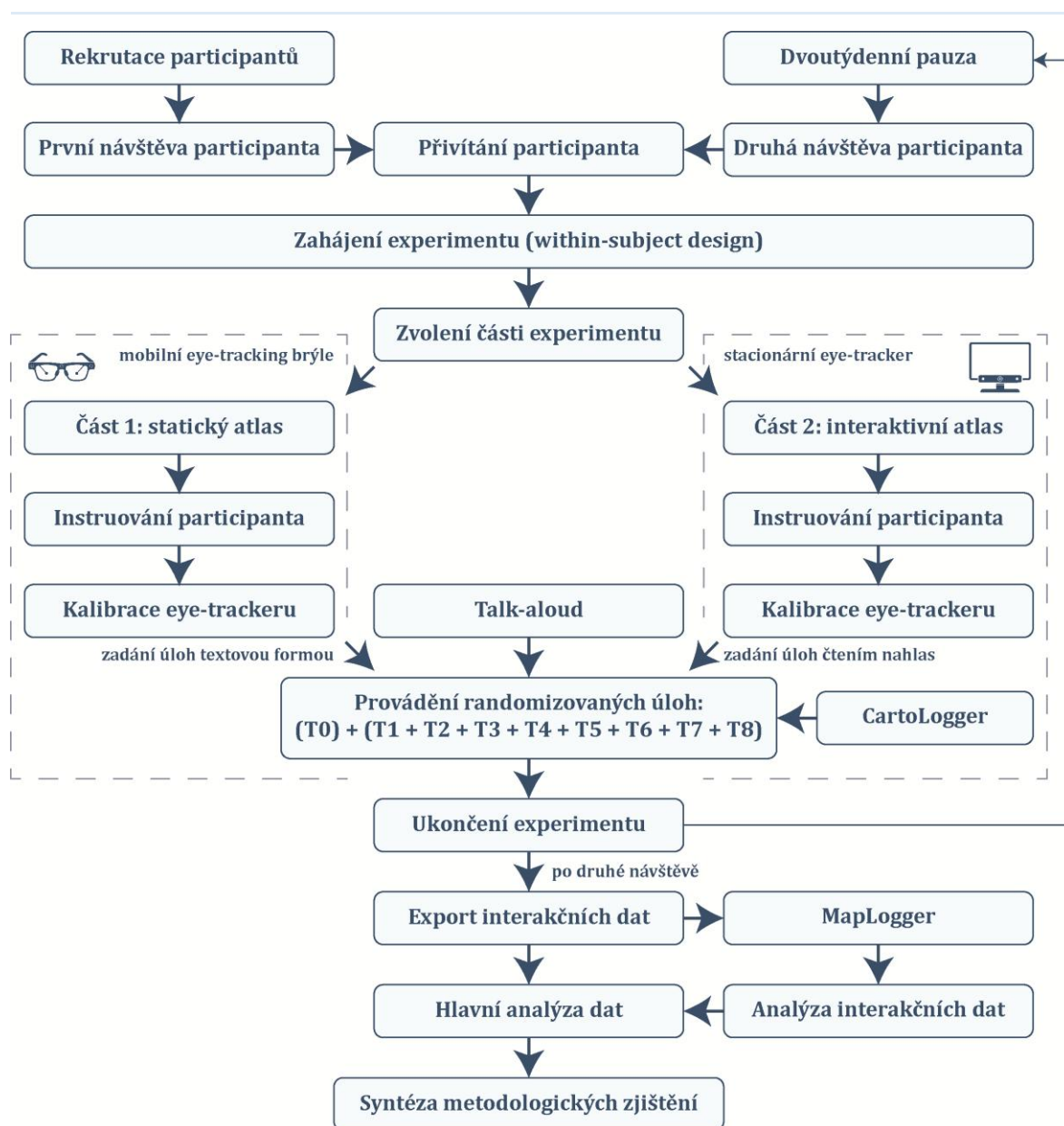
stránky v zorném poli kamery, přestože byla snaha toto vše během vlastního experimentu standardizovat. Ačkoli byl tedy samotný kartografický obsah statický, jeho následná analýza nebyla metodologicky triviální a vyžadovala postupy umožňující lokalizovat fixace vzhledem ke konkrétnímu mapovému výřezu.

Interaktivní atlas naproti tomu představoval komplexnější typ kartografického stimulu, u něhož se význam zaznamenaného pohledu odvíjel nejen od polohy fixace, ale také od aktuálního stavu aplikace. Uživatel mohl měnit měřítko zobrazení pomocí ovládacích prvků nebo kolečka myši, posouvat mapové pole, zapínat či vypínat tematické mapy, zobrazit mapu v celém rozsahu nebo využívat doplňkové informace a nápovědu. Vedle těchto základních operací atlas obsahoval také pokročilejší formy interaktivity, například aktivaci vyskakovacích oken a postranních panelů, odečítání souřadnic podle polohy kurzoru, vyhledávání adres nebo témat s našeptávačem, zvýrazňování mapových prvků po kliknutí či přjetí kurzorem (hover) a využití nadstavbových nástrojů. Mezi tyto nástroje patřily například materiály pro učitele, tisk nebo export zobrazení do PDF, webinář k práci s atlasem a nastavení mapy umožňující změnu kartografického zobrazení, typu zobrazení či překrytí vrstev. Interaktivní atlas tak oproti statické variantě poskytoval uživateli širší prostor pro exploraci a volbu vlastní strategie, současně však zásadně komplikoval následnou interpretaci eye-tracking dat, protože stejná obrazová souřadnice mohla v různých okamžicích odpovídat odlišnému geografickému nebo tematickému obsahu.

Zařazení obou typů stimulů proto mělo v případové studii nejen aplikační, ale především **metodologický význam**. Statický atlas reprezentoval tradiční kartografický produkt s pevně danou strukturou a umožňoval testovat analytické postupy v prostředí, kde se neměnil samotný mapový obsah, avšak proměnlivost vznikala v důsledku real-world způsobu záznamu pomocí mobilních eye-tracking brýlí. Interaktivní atlas naopak představoval digitální kartografické prostředí, v němž se proměňoval jak rozsah a měřítko mapy, tak dostupné tematické vrstvy, aktivované prvky a informační panely. Tato dvojice produktů tak umožnila ověřit, do jaké míry bylo možné využít **asistované mapování fixací** do statického snímku pro různé typy kartografických médií a jaké **limity** tento postup vykazoval při analýze komplexních mapových úloh v reálném experimentálním prostředí.

7.3.2 Zadání úloh a průběh experimentu (PS3)

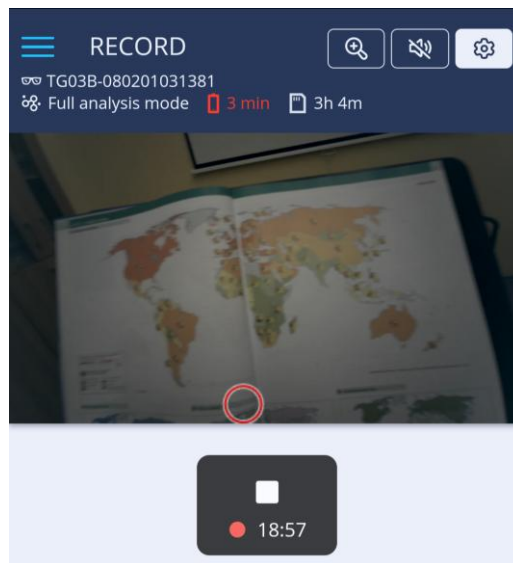
Případová studie byla realizována ve dvou částech, které odpovídaly dvěma hodnoceným podobám atlasu. První část byla zaměřena na práci se statickým atlasem a využívala mobilní eye-tracking brýle, zatímco druhá část pracovala s interaktivním atlasem a byla realizována pomocí stacionárního eye-trackeru. Studie byla koncipována jako **within-subject design**, což znamenalo, že každý participant absolvoval obě části experimentu. Aby byl omezen efekt učení a přímý přenos strategie mezi jednotlivými variantami atlasu, byly obě návštěvy participanta odděleny přibližně dvoutýdenní pauzou. Celkový průběh experimentu znázorňuje **Obrázek 64**, který zachycuje návaznost jednotlivých fází od rekrutace participantů přes první a druhou návštěvu až po hlavní analýzu dat a syntézu metodologických zjištění.



Obrázek 64: Průběh experimentu PS3 zaměřené na porovnání práce se statickým a interaktivním atlasem.

Po příchodu byl participant přivítán, uveden do problematiky experimentu a seznámen s obecným průběhem testování. Následně byla zahájena příslušná část experimentu, přičemž v obou variantách proběhla instruktáž participanta a kalibrace použitého eye-tracking zařízení. Výchozí stav byl pro obě části standardizován odlišným způsobem podle povahy stimulu. V případě interaktivního atlasu byla výchozí pozicí úvodní stránka atlasu, zatímco v případě statické varianty byl výchozím stavem zavřený tištěný atlas. U statického atlasu byl navíc **využit stojan na noty**, na který byl atlas umístěn, aby byly co nejvíce sjednoceny podmínky pozorování, poloha mapového podkladu a vzdálenost mezi participantem a stimulem. Přestože šlo o statický kartografický produkt, použití mobilních eye-tracking brýlí znamenalo, že záznam pohledu byl pořizován **v reálném prostoru (Obrázek 65)** a bylo nutné

počítat s pohybem hlavy, proměnlivou perspektivou a následnou potřebou prostorového vztažení fixací ke konkrétní stránce atlasu.



Obrázek 65: Ukázka průběhu měření statického atlasu v reálném prostoru.

Součástí experimentu byla **sada devíti úloh (Tabulka 9)**, z nichž první úloha T0 měla seznamovací charakter. Jejím cílem bylo umožnit participantům porozumět principu testování, seznámit se se způsobem zadávání úloh a ověřit, že byli schopni požadovaný typ odpovědi formulovat. Tato úloha měla dvě tematicky podobné, avšak technicky odlišné varianty podle použitého atlasu: u interaktivního atlasu se týkala průměrné teploty vzduchu v červenci v Grónsku (**Obrázek 66**), zatímco u statického atlasu se týkala průměrné teploty vzduchu v lednu na světě. Ostatní úlohy T1–T8 byly hlavními analytickými úlohami a byly participantům předkládány v randomizovaném pořadí. Čas na jejich řešení nebyl omezen, protože cílem nebylo testovat výkon pod časovým tlakem, ale zachytit přirozenou strategii práce s atlasem, způsob vyhledávání vhodné mapy a proces formulace odpovědi.



Obrázek 66: Ukázka průběhu řešení T0 modelovým participantem (viditelný je eye-tracker, mikrofon a řešená úloha na obrazovce).

Zadání úloh bylo pro obě experimentální části koncipováno totožně nebo tematicky co nejvíce srovnatelně, aby bylo možné porovnávat práci se statickým a interaktivním kartografickým obsahem. Participantům nebyla předem určena konkrétní mapa ani přesný postup řešení. Na začátku příslušné části experimentu jim byl zpřístupněn celý atlas, tedy buď interaktivní webový atlas, nebo fyzický tištěný atlas, a následná **volba** mapy, způsob **orientace** v atlasu i **strategie** popisu prostorového rozložení jevu závisely na nich. Úlohy byly navrženy tak, aby pokrývaly různé způsoby kartografického vyjádření, od stínovaných izoliní, hypsometrických odstínů a plošných znaků přes dasymetrickou mapu a kartogram až po bodové a liniové znaky. Současně se lišily typem zobrazených prvků a typem dat, tedy tím, zda participant pracoval s plošnými, bodovými či liniovými jevy a zda měl interpretovat kvalitativní nebo kvantitativní informaci. Z hlediska kategorizace úloh vycházející z DC1 spadaly všechny úlohy do skupiny analytických mapových úloh zaměřených na popis a interpretaci prostorového rozložení jevu. Nešlo tedy o jednoduché lokalizační úlohy typu nalezení jednoho objektu, ale o úlohy vyžadující syntetizaci informací z mapy, identifikaci prostorového vzorce a slovní popis rozmístění sledovaného jevu. Tento typ úloh byl pro případovou studii vhodný, protože předpokládal aktivní práci s mapovým obsahem, vyhledávání relevantní mapy, čtení legendy, orientaci v tematických vrstvách a formulaci odpovědi na základě prostorového uspořádání zobrazených dat.

Tabulka 9: Přehled úloh PS3 pro participanty (pořadí úloh bylo randomizováno)

ID úlohy	Typ úlohy	Zadání úlohy	Způsob vyjádření	Typ zobrazených prvků	Typ dat	Časový limit
T0	Seznamovací analytická	Popište prostorové rozložení průměrné teploty vzduchu v červenci v Grónsku.	Stínované izolinie	"Plocha"	Kvantitativní	Bez limitu
T0	Seznamovací analytická	Popište prostorové rozložení průměrné teploty vzduchu v lednu na světě.	Stínované izolinie	"Plocha"	Kvantitativní	Bez limitu
T1	Analytická	Popište prostorové rozložení výškového uspořádání Evropy.	Hypsometrické odstíny	"Plocha"	Kvantitativní	Bez limitu
T2	Analytická	Popište prostorové rozložení šířkových vegetačních pásem Afriky.	Plošné znaky	Plocha	Kvalitativní	Bez limitu
T3	Analytická	Popište prostorové rozložení hustoty zalidnění severní Ameriky.	Dasymetrická m.	"Plocha"	Kvantitativní	Bez limitu
T4	Analytická	Popište prostorové rozložení těžby zlata v Asii.	Bodové znaky	Bod	Kvalitativní	Bez limitu
T5	Analytická	Popište prostorové rozložení zemětřesení na světě.	Bodové znaky	Bod	Kvantitativní	Bez limitu
T6	Analytická	Popište prostorové rozložení spotřeby kalorií ve světě.	Kartogram	Kartogram	Kvantitativní	Bez limitu
T7	Analytická	Popište prostorové rozložení současných námořních tras ve světě.	Liniové znaky	Linie	Kvantitativní	Bez limitu
T8	Analytická	Popište prostorové rozložení objevných cest ve světě.	Liniové znaky	Linie	Kvalitativní	Bez limitu

V případě interaktivního atlasu byly úlohy participantům předkládány **v textové podobě** na obrazovce, zatímco v případě statického atlasu byly **čteny nahlas** výzkumníkem. Tento rozdíl vyplýval z odlišného experimentálního nastavení a z potřeby nenarušovat práci s fyzickým atlasem dodatečnými textovými materiály v zorném poli participanta. Zadání mohlo být u statické varianty v průběhu řešení zopakováno, pokud o to participant požádal nebo pokud bylo zřejmé, že potřeboval připomenout přesnou formulaci úlohy. V obou částech experimentu odpovídali participanti nahlas a jejich slovní odpovědi byly zaznamenávány prostřednictvím mikrofону. Experiment proto nepracoval pouze s pasivním sledováním mapového obsahu, ale vyžadoval aktivní participaci, při níž participant mapu prohledával, interpretoval zobrazené jevy a průběžně formuloval vlastní odpověď.

V průběhu řešení úloh byla využita **metoda talk-aloud**, jejímž cílem bylo zachytit slovní projevy participantů bez nutnosti systematického vysvětlování všech myšlenkových procesů. Tato metoda doplňovala eye-tracking záznam o interpretační vrstvu, která umožňovala lépe porozumět tomu, jak participant k odpovědi dospěl, jakou mapu považoval za relevantní, které části mapového obsahu využíval a v jakých situacích docházelo k nejistotě či změně strategie. Kombinace eye-tracking záznamu, zvukové stopy a sledování průběhu řešení úloh byla důležitá zejména proto, že cílem případové studie nebylo pouze zjistit, zda participant odpověděl správně, ale především analyzovat, jakým způsobem bylo možné zpracovat a interpretovat data vzniklá při práci se dvěma odlišnými typy atlasového prostředí.

Po dokončení první experimentální části byla realizována přibližně **dvoutýdenní pauza** a následně participant absolvoval druhou část experimentu s druhým typem atlasu. Teprve po ukončení obou návštěv a po sběru dat od všech participantů byla provedena hlavní analýza dat, která zahrnovala práci s eye-tracking záznamy, odpověďmi participantů a časovým průběhem jednotlivých úloh. Výsledkem této analytické fáze nebylo pouze vyhodnocení práce s atlasem, ale především syntéza metodologických poznatků vztahujících se ke zpracování dat ze statického a interaktivního kartografického stimulu. Tato syntéza tvořila klíčový výstup případové studie PS3, protože umožnila zhodnotit, jaké analytické postupy byly vhodné pro práci s mobilním eye-tracking záznamem u tištěného atlasu a jaké problémy vznikaly při analýze interaktivního atlasu zaznamenaného pomocí stacionárního eye-trackeru.

7.3.3 Participantů (PS3)

Experimentu se zúčastnilo celkem **47 participantů**. Soubor tvořily dvě skupiny, které se lišily věkem i studijním zaměřením. První skupinu představovali **studenti prvního semestru bakalářského studia geoinformatiky** ve věku 19–20 let ($n = 27$). Druhou skupinu tvořili **studenti Gymnázia Uničov** ve věku 17–18 let ($n = 20$). Žádný z participantů se před realizací experimentu nesetkal s testováním metodou eye-tracking, což lze z hlediska návrhu studie označit jako výhodu, protože účastníci tak nebyli předem ovlivněni znalostí principu měření očních pohybů ani zkušeností s podobným typem laboratorního testování. **Zkušenosti participantů** s oběma testovanými atlasy byly zjišťovány až po ukončení příslušné části experimentu, aby tato informace předem neovlivnila jejich chování při práci se stimulem.

Pro potřeby anonymizace a následného zpracování dat byli participantů označeni kódy podle příslušnosti ke skupině. Studenti bakalářského studia geoinformatiky byli označeni jako Ux, kde x odpovídalo pořadovému číslu participanta, zatímco studenti gymnázia byli označeni jako Gx. Toto označení bylo využíváno ve všech navazujících fázích zpracování dat, tedy při evidenci

účasti v jednotlivých částech experimentu, při organizaci záznamů ze stacionárního a mobilního eye-trackingu i při následných analýzách. U každého participanta bylo současně evidováno, zda již absolvoval první, nebo druhou část experimentu. Vzhledem k tomu, že studie byla navržena jako *within-subject design*, bylo nutné kontrolovat také dodržení přibližně dvoutýdenního rozestupu mezi oběma návštěvami.

Rekrutace participantů probíhala odlišně pro obě skupiny. Studenti Gymnázia Uničov byli osloveni na základě existujících kontaktů s danou institucí, přičemž následně byly domluveny konkrétní termíny účasti jednotlivých studentů. V případě studentů bakalářského studia geoinformatiky probíhal nábor příležitostným způsobem během jejich přítomnosti na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci a na základě jejich dobrovolného zájmu o účast ve studii. Po absolvování první části experimentu byli participanté následně vyzváni k účasti na druhé části prostřednictvím připomínkového e-mailu, jehož účelem bylo připomenout návaznost experimentu a umožnit výběr konkrétního termínu druhé návštěvy. Každý participant obdržel za účast v každé části experimentu **drobnou sladkou odměnu**. Studenti gymnázia navíc po absolvování obou částí experimentu obdrželi také **malou finanční kompenzaci**, která pokrývala jejich časovou investici a náklady spojené s dopravou z Uničova na místo testování a zpět.

Po ukončení jednotlivých částí experimentu byla u participantů zjišťována také **předchozí zkušenost** s použitými atlasovými produkty. V případě statického *Školního atlasu světa* od *Kartografie Praha* bylo zjištěno, že jej znali všichni participanté ze skupiny gymnázia a většina participantů ze skupiny geoinformatiky; pouze tři studenti geoinformatiky uvedli, že tento atlas dříve neznali. Celkově tedy statický atlas znalo 44 ze 47 participantů, což odpovídalo 93,6 % výzkumného souboru. Naproti tomu interaktivní atlas dostupný prostřednictvím *Mapy.cz* byl mezi participanty výrazně méně známý. Ze skupiny gymnázia jej znalo 7 z 20 participantů a ze skupiny geoinformatiky 6 z 27 participantů, celkem tedy 13 ze 47 participantů, což odpovídalo 27,7 % souboru. Tento rozdíl ukázal, že statický školní atlas představoval pro testované participanty obecně známější a běžnější kartografické médium než jeho interaktivní digitální alternativa.

Zjištěné rozdíly v předchozí znalosti obou atlasů byly pak důležité pro interpretaci výsledků, protože zkušenost s produktem mohla ovlivnit rychlost orientace, způsob vyhledávání relevantní mapy i volbu strategie při řešení úloh. U statického atlasu bylo možné předpokládat vyšší míru obeznámenosti s obecnou strukturou školního atlasu, zatímco u interaktivního atlasu byla práce pro většinu participantů novější zkušeností. Z doplňujících reakcí participantů zároveň vyplynulo, že zejména u mladší skupiny studentů nebylo používání map na stolním počítači samozřejmé, protože část z nich byla zvyklá pracovat s digitálními mapami primárně prostřednictvím mobilního telefonu. Tato skutečnost představovala relevantní kontext pro hodnocení práce s interaktivním atlasem na obrazovce počítače, protože zkušenost s digitálními mapami se nemusela automaticky přenášet do prostředí webové atlasové aplikace ovládané pomocí myši a desktopového rozhraní.

7.3.4 Analýza dat (PS3)

Experimentální část případové studie PS3 probíhala v průběhu několika týdnů na podzim roku 2023 v laboratoři pro sledování pohybu očí na Katedře geoinformatiky UP. Vzhledem k tomu, že studie pracovala se dvěma odlišnými typy atlasových stimulů, bylo nutné zvolit také odlišné technické a analytické postupy pro záznam a následné zpracování dat. V části zaměřené na statický, tištěný atlas byly oční pohyby a slovní výpovědi participantů zaznamenávány pomocí mobilních eye-tracking brýlí **Tobii Pro Glasses 3**, které umožnily sledovat práci s fyzickým atlasem v real-world prostředí experimentu. V části zaměřené na interaktivní atlas byl naopak využit stacionární eye-tracker **Tobii Pro Spectrum** se vzorkovací frekvencí 300 Hz, přičemž experimentální scénář byl připraven a spravován v prostředí **Tobii Pro Lab**. Toto rozdělení odpovídalo povaze obou stimulů, avšak současně vedlo k rozdílným nárokům na následné zpracování dat, protože v jednom případě bylo nutné pracovat se záznamem scény reálného prostoru a ve druhém s dynamickým digitálním prostředím ovládaným uživatelskou interakcí. Následující část kapitoly proto představuje **postup analýzy dat** rozdělený do několika tematicky navazujících oblastí. Nejprve je pozornost věnována analýze dat ze statického atlasu, kde hlavní metodologickou výzvu představovalo vztažení fixací zaznamenaných mobilními eye-tracking brýlemi ke konkrétním částem stránek atlasu. Následně je popsána analýza interaktivního atlasu, u něhož bylo nutné zohlednit proměnlivost mapového obsahu, změny měřítka, posuny mapy a další interakce ovlivňující interpretaci zaznamenaného pohledu. Samostatná pozornost je dále věnována možnostem záznamu uživatelských interakcí prostřednictvím nástrojů **CartoLogger** a **MapLogger** a jejich potenciálu pro doplnění eye-tracking dat o objektivní záznam práce s interaktivním prostředím. Na tyto části navázala korelační analýza vybraných eye-tracking proměnných a závěrečná reflexe možností dalšího zpracování dat, zejména ve vztahu k budoucímu využití lingvistické analýzy projevů participantů zaznamenaných **metodou talk-aloud**.

Analýza statického atlasu

Analýza dat ze statického atlasu vycházela z principu **asistovaného mapování fixací** do statického snímku v prostředí **Tobii Pro Lab**. Tento postup byl zvolen proto, že záznam pořízený mobilními eye-tracking brýlemi Tobii Pro Glasses 3 nebyl primárně vztažen k pevné souřadnicové soustavě konkrétní stránky atlasu, ale ke scéně ve videu zaznamenané z perspektivy participanta. Aby bylo možné data dále kvantitativně a vizuálně analyzovat, bylo nutné převést fixace ze záznamu scény na stabilní obrazovou reprezentaci příslušné mapové dvojstrany. Tobii Pro Lab tento typ postupu umožňuje prostřednictvím mapování dat pohledu (surová data anebo fixace) na statické snímky zobrazující prostředí nebo objekty scény, přičemž mapování může být provedeno manuálně nebo asistovaně pomocí algoritmu *assisted mapping*. Takto namapované fixace lze následně využít pro tvorbu heatmap, sekvencí fixací nebo oblastí zájmu (AOI) ([Tobii.com](https://www.tobii.com), 2021).

Před samotným mapováním bylo nutné provést **přípravnou fázi** zpracování záznamů. V projektu Tobii Pro Lab označeném jako *IPA-Atlas-Brýle* byli nejprve sjednoceni a **přejmenováni participant** v sekci *Participants*, aby bylo možné používat jednotný systém označení napříč všemi záznamy a analytickými výstupy. Participant

bylo nezbytné zejména proto, že další analytické kroky probíhaly odděleně pro jednotlivé participanty, jednotlivé úlohy a konkrétní mapové dvojstrany použité během experimentu.

V další fázi byly v jednotlivých nahrávkách manuálně definovány **specifické události (events)** pro každou úlohu. Tyto události vymezovaly časové značky začátku a konce úlohy, přičemž jejich určení probíhalo ručně při procházení videozáznamů, zpravidla při přehrávání 1,5násobnou rychlostí. Začátek úlohy byl definován okamžikem, kdy participant začal otevírat atlas, zatímco konec úlohy byl stanoven ve chvíli, kdy byl atlas po dokončení odpovědi opět plně zavřen. Z dvojic těchto událostí byly následně vytvořeny „časové intervaly zájmu“ (*Time of Interest* = **TOI**), které umožňovaly omezit analýzu pouze na relevantní část záznamu odpovídající řešení konkrétní úlohy (**Obrázek 67**). Paralelně s kontrolou videozáznamů byly do samostatné excelové tabulky zaznamenávány mapy, respektive **dvojstrany atlasu**, které participant pro řešení jednotlivých úloh skutečně **použili**. Tento krok byl důležitý, protože participant neměli předem určenou konkrétní stránku atlasu a vhodnou mapu vyhledávali samostatně.



Obrázek 67: Ukázka vymezení časové značky pro konec úlohy (zavření atlasu) a vytvoření TOI v prostředí Tobii Pro Lab.

Na základě této evidence byly použité mapové dvojstrany profesionálně nafotografovány ve vysokém, původně 4K rozlišení. Tyto snímky sloužily jako referenční **snapshots**, do nichž měly být následně přiřazeny fixace z mobilního eye-tracking záznamu. V prostředí Tobii Pro Lab byly pro každého participanta přidány odpovídající snímky těch map, které během dané úlohy skutečně použil. V časové ose záznamu byl poté vyznačen příslušný úsek práce s mapou a byla spuštěna funkce *run assisted mapping*. Princip tohoto kroku spočíval v tom, že software porovnával jednotlivé snímky ze scény videa se zvoleným statickým snímkem mapové dvojstrany a pokoušel se automaticky nalézt odpovídající pozici fixace na referenčním obraze (**Obrázek 68**).



Obrázek 68: Příklad správně přiřazené fixace z videa (vpravo) do statického snímku dvojstrany atlasu (vlevo) v prostředí Tobii Pro Lab.

V průběhu zpracování se ukázalo, že **úspěšnost** asistovaného mapování nebyla dána pouze samotnou kvalitou eye-tracking záznamu, ale výrazně závisela také na **podobě referenčního snímku**, jeho rozlišení, velikosti souboru, barevnosti, kontrastu a podobnosti vůči reálnému záznamu scény. Původně byly do Tobii Pro Lab importovány profesionálně pořízené snímky ve 4K rozlišení, jejichž průměrná velikost dosahovala přibližně 15 MB. V této podobě však zpracování algoritmem trvalo neúměrně dlouho a v některých případech nedoběhlo ani po několika hodinách, případně došlo k zamrznutí systému. Z tohoto důvodu byly snímky převedeny do doporučeného rozlišení 1920 × 1080 pixelů, avšak ani tato varianta nevedla k jednoznačně spolehlivému výsledku. Následně proto proběhlo další testování s nově pořízenými fotografiemi atlasových dvojstran pomocí mobilního telefonu *Google Pixel 6* s 50Mpx fotoaparátem. Při fotografování byly stránky fixovány držákem a sponami, aby byla zachována jejich rovinnost, a současně byly co nejvíce napodobeny světelné podmínky reálného experimentu. Tyto snímky byly po importu do projektu ve většině případů zpracovány úspěšněji, avšak výsledky zůstaly nekonzistentní. V další fázi proto byly znovu použity profesionálně nafotografované mapy, avšak v podobě snížené kvality a velikosti získané prostřednictvím snímku obrazovky (tj. screenshot). Tato varianta vedla k lepším výsledkům než původní 4K fotografie, ale ani zde nebyla zajištěna úplná konzistence a přesnost. Nakonec bylo přistoupeno ke změně počítače a aktualizaci Tobii Pro Lab na verzi 1.241, přičemž na výkonnějším zařízení⁴¹ bylo mapování fixací funkční pro všechny testované typy snímků, i když výsledná kvalita přiřazení se mezi mapami dále lišila.

Pro ověření efektivity a kvality asistovaného mapování byly porovnány **čtyři varianty** referenčních snímků mapové dvojstrany (**Tabulka 10**): původní 4K snímek (A), fotografie pořízená mobilním zařízením (B), screenshot původního 4K snímku (C) a původní 4K snímek redukováný na rozlišení 1920 × 1080 pixelů (D).

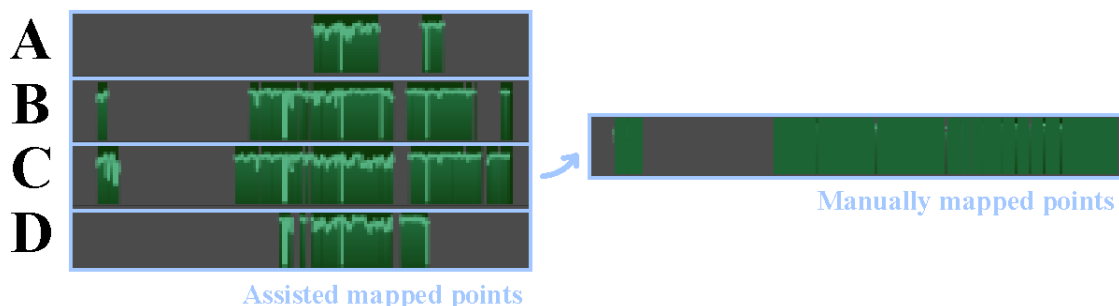
⁴¹ Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40GHz processor; 16.0 GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 770 grafika

Tabulka 10: Porovnání efektivity a kvality asistovaného mapování fixací při použití odlišných typů referenčních snímků dvojstrany atlasu

Varianta snímku	A	B	C	D
Rozlišení snímku	5809 × 4066 px	3469 × 2370 px	1357 × 9550 px	1920 × 1080 px
Velikost snímku	16,6 MB	1,8 MB	0,3 MB	2,6 MB
Průměrný čas pro přiřazení fixací (60 s záznam)	188 s (3,1×)	68 s (1,1×)	85 s (1,4×)	120 s (2,0×)
Průměrná kvalita asistovaného mapování	Střední (36 %)	Vysoká (71 %)	Vysoká (85 %)	Střední (40 %)

V rámci testovaného příkladu fyzickogeografické mapy Evropy se ukázalo, že vyšší rozlišení a větší velikost souboru **nevedly automaticky k lepšímu mapování**. Naopak platilo, že větší počet pixelů a vyšší datová náročnost prodlužovaly dobu přiřazování fixací a v některých případech snižovaly jeho kvalitu. V dílčím přepočtu na šedesátisekundový segment byla u původního 4K snímku zjištěna průměrná doba přiřazování fixací 188 s a kvalita mapování pouhých 36 %, zatímco u fotografie z mobilního zařízení šlo o 68 s a 71 %, u screenshotu původního snímku o 85 s a 85 % a u redukované varianty 1920 × 1080 pixelů o 120 s a 40 %. Z hlediska kombinace časové efektivity a kvality přiřazení tak nejlépe vycházela varianta založená na redukováném screenshotu původního snímku. Kvalita mapování byla vyhodnocována jako poměr počtu fixací automaticky přiřazených pomocí asistovaného mapování k celkovému počtu fixací v daném časovém úseku, přičemž výsledné hodnoty byly interpretovány ve třech kategoriích: nízká kvalita 0–33 %, střední kvalita 34–66 % a vysoká kvalita 67–100 %.

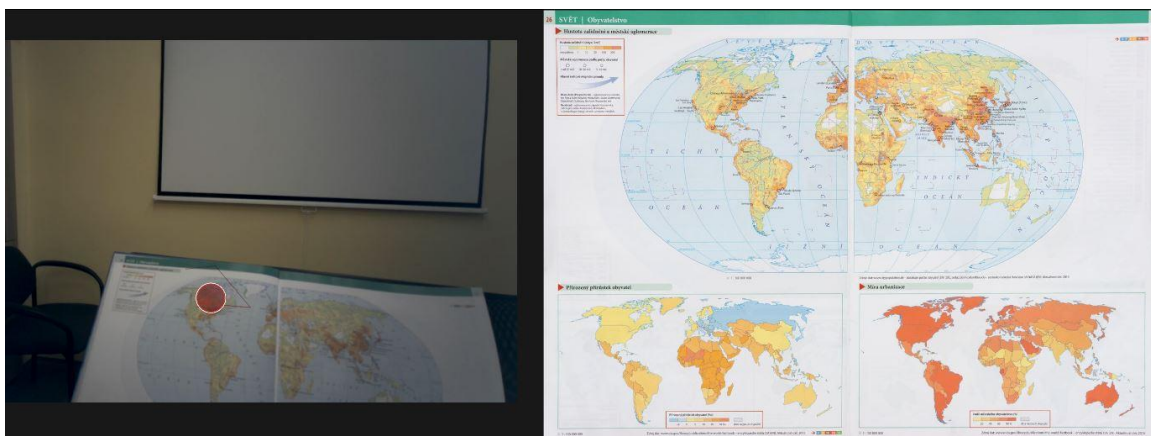
Součástí kontroly výsledků byla také práce s ukazatelem **podobnosti** (*Similarity score*), který Tobii Pro Lab zobrazuje při asistovaném mapování do snímku. Tento ukazatel vyjadřuje míru podobnosti mezi záznamem scény a referenčním snímkem, respektive míru jistoty algoritmu při vztažení fixace ke konkrétní pozici ve snímku. Nižší hodnota podobnosti však automaticky neznamenala chybné přiřazení, ale spíše nižší míru jistoty algoritmu. Body s hodnotou pod nastaveným prahem podobnosti byly zvýrazněny oranžově, což umožňovalo rychleji identifikovat fixace vyžadující kontrolu. Pokud byla fixace přiřazena chybně, bylo možné ji ručně přemapovat kliknutím na správné místo ve snímku; takto manuálně opravené body byly v systému zobrazeny zeleně a obdržely hodnotu podobnosti 100 (**Obrázek 69**).



Obrázek 69: Ukázka kontroly kvality asistovaného mapování (vlevo) a manuálního doplnění fixací (vpravo) v prostředí Tobii Pro Lab.

V rámci zpracování byl testován také parametr *Similarity threshold*, který lze nastavit v rozsahu 0–100. Vyšší hodnota tohoto parametru znamenala přísnější posuzování podobnosti mezi záznamem scény a referenčním snímkem. Praktické testování však ukázalo, že nastavení prahu nad hodnotu přibližně 70 vedlo k tomu, že část správně přiřazených fixací přestala být zobrazována nebo byla algoritmem označena jako nejistá, přestože vizuální kontrola potvrzovala jejich správné umístění. Naopak při nastavení pod hodnotou 70 nebyl zaznamenán podstatný rozdíl v počtu ani charakteru přiřazených fixací. Z tohoto důvodu byla při kontrole dat hlavní pozornost věnována především vizuální validaci výsledků a manuálnímu doplnění chybějících nebo nesprávně přiřazených bodů, nikoliv pouze automatickému spoléhání na hodnotu prahu podobnosti.

Výrazným limitem asistovaného mapování byly **mapy s nízkou barevnou a kontrastní variabilitou**. Problémy se objevovaly zejména u map světa, v nichž dominovala jedna barva, typicky modrá plocha oceánů, a kde proto docházelo k výskytu velkého množství vzájemně podobných obrazových oblastí. Tato situace se týkala především map námořní dopravy a objevných cest, tedy zejména úloh pracujících s liniovými prvky v globálním měřítku. U takových stimulů algoritmus často nedokázal fixace spolehlivě přiřadit automaticky, případně docházelo k vynechávání některých fixací i v situaci, kdy předchozí a následující fixace byly umístěny správně. V praxi se objevoval například opakující se vzorec, kdy bylo několik fixací přiřazeno korektně, poté dvě fixace chyběly, a následně algoritmus opět pokračoval ve správném přiřazování. Z tohoto důvodu musela být každá namapovaná sekvence vizuálně zkontrolována a v případě potřeby ručně doplněna. Časová náročnost manuální korekce přitom přibližně odpovídala délce kontrolovaného segmentu; pokud byl například doplňován pětiminutový úsek práce s mapou, zabrala kontrola a korekce přibližně dalších pět minut. Nepřiřazení fixací do referenčního obrázku bylo také dáno situacemi, kdy se participant k atlasu přiblížil moc blízko nebo byla v zorném poli kamery viditelná pouze část dvojstrany atlasu, takže algoritmus neměl k dispozici dostatečně jednoznačný obrazový kontext pro správné přiřazení fixace (**Obrázek 70**).



Obrázek 70: Příklad situace, kdy nebyla fixace správně nalezena v referenčním snímku (vpravo) z důvodu neúplného nebo nejednoznačného zachycení stimulu ve scéně (vlevo).

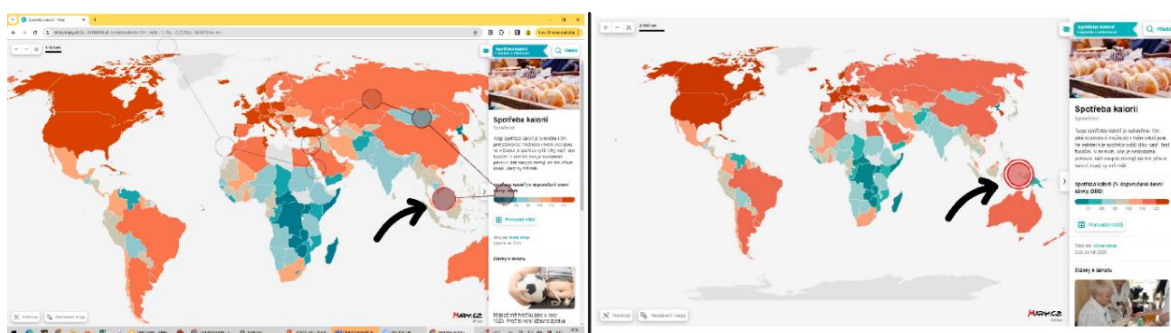
Z praktického hlediska se tak potvrdilo, že pro úspěšné asistované mapování bylo vhodné, aby byl atlasový stimul v záznamu scény zachycen pokud možno **celý**, v dostatečné **ostrosti**, bez výrazné perspektivní deformace a s podobnými světelnými, kontrastními a barevnými vlastnostmi jako referenční snímek. Problematické byly naopak situace, kdy byla stránka atlasu zachycena pouze částečně, kdy participant měnil vzdálenost od atlasu, nebo kdy byla referenční mapa příliš homogenní a neposkytovala algoritmu dostatek odlišitelných vizuálních prvků. Přestože Tobii Pro Lab umožňoval automatizovat podstatnou část procesu, výsledky nebylo možné přijmout bez kontroly. Asistované mapování proto v této případové studii nepředstavovalo plně automatický postup, ale spíše poloautomatickou metodu, která výrazně urychlila práci oproti čistě manuálnímu mapování, avšak stále vyžadovala expertní kontrolu, rozhodování a průběžnou korekci.

Výsledkem celého procesu bylo, že všechny relevantní fixace ze statické části experimentu byly nakonec **úspěšně přiřazeny** do odpovídajících snímků atlasových dvojstran atlasu. V řadě případů postačovalo automatické nebo asistované přiřazení, v jiných bylo nutné provést manuální korekci, případně doplnit fixace, které algoritmus vynechal. Nejvyšší míru manuálních zásahů vyžadovaly zejména méně barevné a méně kontrastní mapy, typicky mapy s převahou oceánské plochy a liniových prvků, například u úlohy T8 zaměřené na objevné cesty. Celý postup byl realizován a ověřován v roce 2024, a proto je nutné jej interpretovat v kontextu tehdy používaných verzí softwaru, dostupného hardwaru a tehdejší spolehlivosti algoritmu asistovaného mapování. V novějších verzích Tobii Pro Lab již došlo k dalšímu vývoji programu, přičemž výrobce uvádí kontinuální zlepšování softwaru a v pozdějších verzích také změny související se stabilitou, prací se soubory, podporou nových záznamů a dalšími analytickými funkcemi. Zjištěné problémy proto nemusejí v roce 2026 odpovídat aktuálním možnostem nejnovější verze softwaru, avšak jejich uvedení má význam pro transparentní dokumentaci analytického postupu, pro archivaci metodologických rozhodnutí a jako doklad skutečné pracnosti zpracování dat v této případové studii.

Analýza interaktivního atlasu

Analýza dat z interaktivního atlasu představovala metodologicky **náročnější část** případové studie, protože na rozdíl od statického atlasu nešlo pracovat s jedním stabilním kartografickým obrazem. Webový atlas *Mapy.cz* poskytoval dynamické prostředí, v němž se obsah mapy v průběhu řešení úloh měnil v závislosti na změně měřítka, posunu mapového pole, aktivaci tematických prvků, práci s postranním panelem, legendou a dalšími interaktivními funkcemi. Zatímco u tištěného atlasu bylo možné předpokládat stabilní vztah mezi fixací a konkrétním místem na dvojstraně atlasu, u interaktivního atlasu se stejná obrazová pozice mohla v různých okamžicích vztahovat k odlišnému geografickému prostoru, jiné vrstvě nebo zcela jinému stavu rozhraní.

Prvním krokem bylo ověření, zda lze i pro webový atlas využít **asistované mapování** v Tobii Pro Lab obdobně jako u tištěného atlasu. Pro vybrané úlohy byly proto vytvořeny statické screenshoty dokončeného nebo předpokládaného stavu mapy a tyto snímky byly vloženy do Tobii Pro Lab jako referenční snímky pro asistované mapování. Následně bylo spuštěno mapování fixací ze záznamu interaktivního stimulu na příslušný screenshot. Tento test potvrdil očekávaný problém: více než polovina fixací byla přiřazena chybně nebo nebyla přiřazena vůbec, a to i při nastavení prahu podobnosti na hodnotu 0. Hlavní příčinou byla změna měřítka a proměnlivý obsah mapy. Algoritmus asistovaného mapování vyžadoval pro spolehlivé přiřazení fixací obrazově podobný vstup, tedy ideálně stejný rozsah, stejné měřítko a totožný obsah mapového pole. Tato podmínka však byla u interaktivního atlasu prakticky nesplnitelná. Typickým příkladem byla situace, kdy participant sledoval detailnější nebo jinak posunutý výřez mapy, zatímco referenční obrázek zachycoval odlišné měřítko nebo rozsah. V takovém případě byla fixace přenesena na nesprávnou geografickou pozici, případně zůstala nepřijížděna. Tento problém dokládá **Obrázek 71**, na němž je vlevo zachycen skutečný stav webového stimulu a vpravo referenční snímek, do něhož byla fixace algoritmem přiřazena chybně v důsledku rozdílného měřítka mapy.

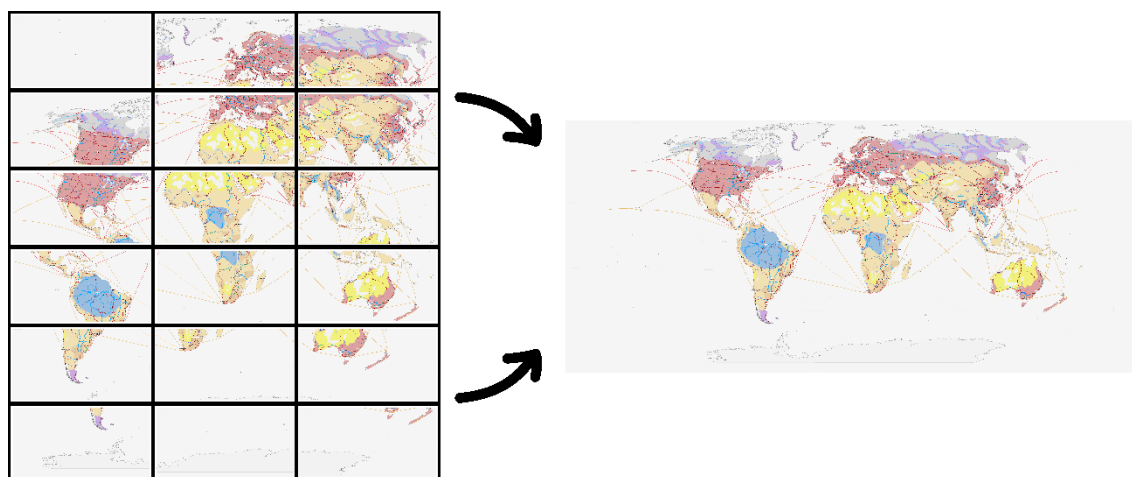


Obrázek 71: Příklad chybně přiřazené fixace z webového mapového stimulu (vlevo) do referenčního snímku (vpravo) v důsledku rozdílného měřítka mapy.

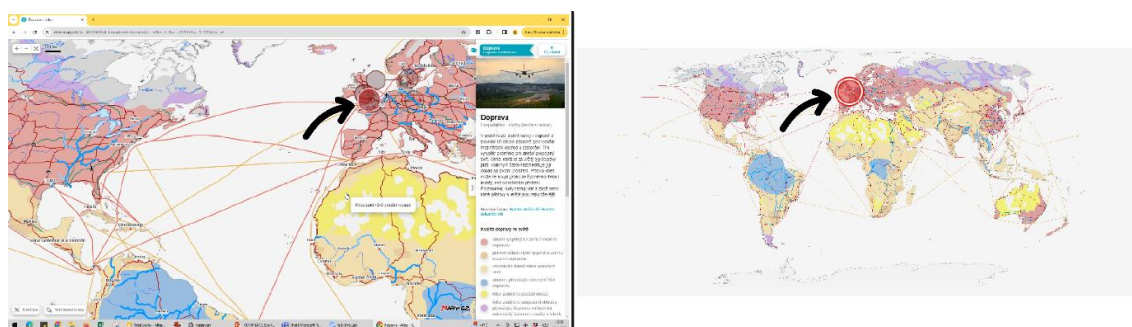
Jako druhý krok byla testována možnost, zda lze účinnost asistovaného mapování zvýšit vytvořením **mozaiky** dílčích mapových výřezů. Tento přístup byl vyzkoušen na tematické mapě dopravy ve světě, u níž bylo zřejmé, že při celosvětovém zobrazení dochází ke ztrátě detailu, zatímco při větším přiblížení se objevují podrobnější tematické informace. Nejprve byl stanoven vhodný zoom, který měl představovat kompromis mezi celkovou čitelností mapy a dostatečnou mírou detailu. Výchozí oddálený zoom byl 2,2 a maximální použitelný detailní

zoom 6,5; jejich průměr činil 4,35, zaokrouhleně **4,4**. Tento zoom byl zvolen jako analyticky vhodný, protože při něm byly čitelné podstatné tematické informace, ale současně již nebylo nutné pracovat s extrémním detailem, u něhož by se obsah mapy dále výrazně měnil. Volba byla následně ověřena kontrolou části videozáznamů, z níž vyplynulo, že většina participantů nepotřebovala pro řešení úlohy podrobnější zoom než přibližně 4,4.

Vytvoření mozaiky bylo samo o sobě **časově náročným metodologickým krokem**. Pro jednu tematickou mapu bylo pořízeno 18 screenshotů dílčích mapových výřezů, které byly následně složeny do jednoho jednotného statického obrazu. Celý postup, od vytvoření screenshotů po sestavení výsledného obrázku, trval přibližně jednu hodinu. Pro tento proces byl využit grafický program Affinity. Výsledná mozaika byla převedena do jednoho snímku s doporučeným rozlišením 1920 × 1080 pixelů a vložena do Tobii Pro Lab jako referenční obrázek pro asistované mapování. Princip tohoto postupu zachycuje **Obrázek 72**, kde jsou vlevo znázorněny dílčí mapové výřezy a vpravo výsledná sjednocená mozaika. Přestože šlo o metodologický kompromis, protože dynamický interaktivní stimul byl redukován na statický obraz, výsledek byl **překvapivě použitelný**. Z celkového počtu 302 zaznamenaných fixací bylo 168 přiřazeno správně, což odpovídalo **úspěšnosti 57 %**. Zbývajících 43 % fixací bylo nutné doplnit nebo opravit manuálně. **Obrázek 73** ukazuje příklad správně přiřazené fixace z webového stimulu do vytvořené mozaiky v detailnějším měřítku.



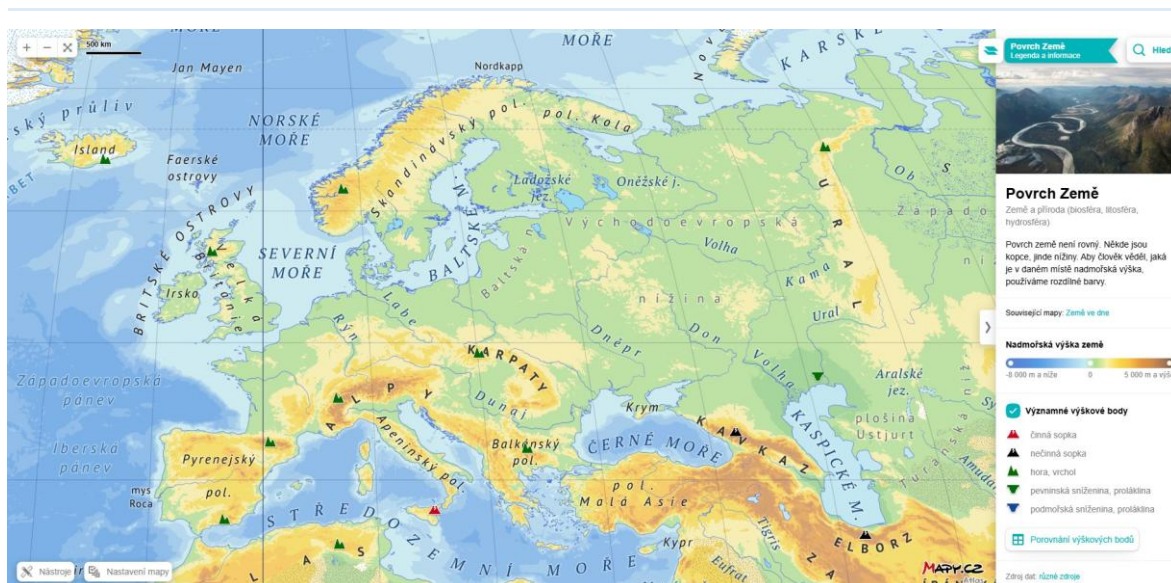
Obrázek 72: Tvorba mozaiky dílčích screenshotů jako referenčního statického snímku pro asistované mapování fixací z interaktivního atlasu.



Obrázek 73: Příklad správně přiřazené fixace z webového mapového stimulu do mozaiky mapových výřezů v detailnějším měřítku.

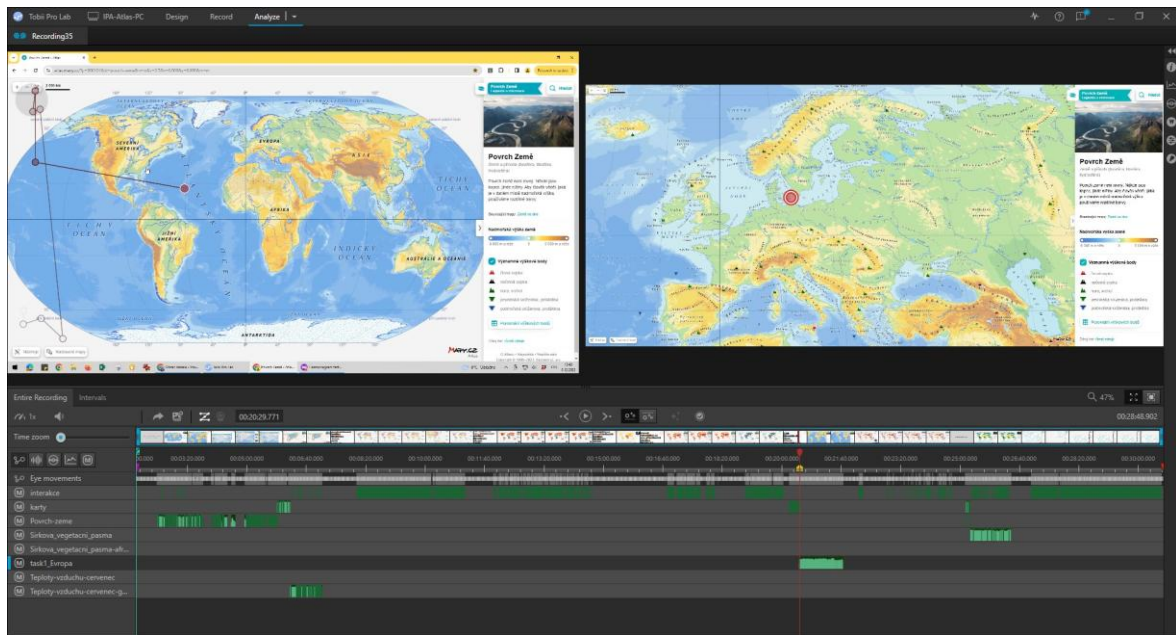
Na základě těchto úvodních testů byly pro **další analýzu** interaktivního atlasu **navrženy a ověřeny tři pracovní přístupy**. Jejich společným cílem bylo převést alespoň část dynamických eye-tracking dat do uchopitelné statické reprezentace, která by umožnila další kontrolu, vizualizaci a případné propojení s dalšími typy dat. Současně však bylo zřejmé, že nejde o plně automatizovatelný postup. Každý z přístupů představoval jiný kompromis mezi mírou automatického mapování, ruční korekcí, schopností zachytit interaktivitu a časovou náročností zpracování.

První přístup byl založen na **využití asistovaného mapování** u relativně jednodušší úlohy **T1** zaměřené na výškové uspořádání Evropy. Tato úloha byla pro testování zvolena proto, že pracovala s jednodušší mapou, u níž nedocházelo k tak výrazným změnám obsahu ani k intenzivní práci s interaktivními prvky. Nejprve byla vytvořena detailnější mozaika Evropy, do níž bylo spuštěno asistované mapování. Výsledek však nebyl ideální, protože i zde se ukázalo, že změna měřítka a posun mapy zásadně ovlivňují schopnost algoritmu identifikovat správnou polohu fixace. Následně byl proto vytvořen jednodušší screenshot Evropy v menším detailu (**Obrázek 74**), bez použití mozaikového postupu, a tento snímek poskytl efektivnější výsledek.



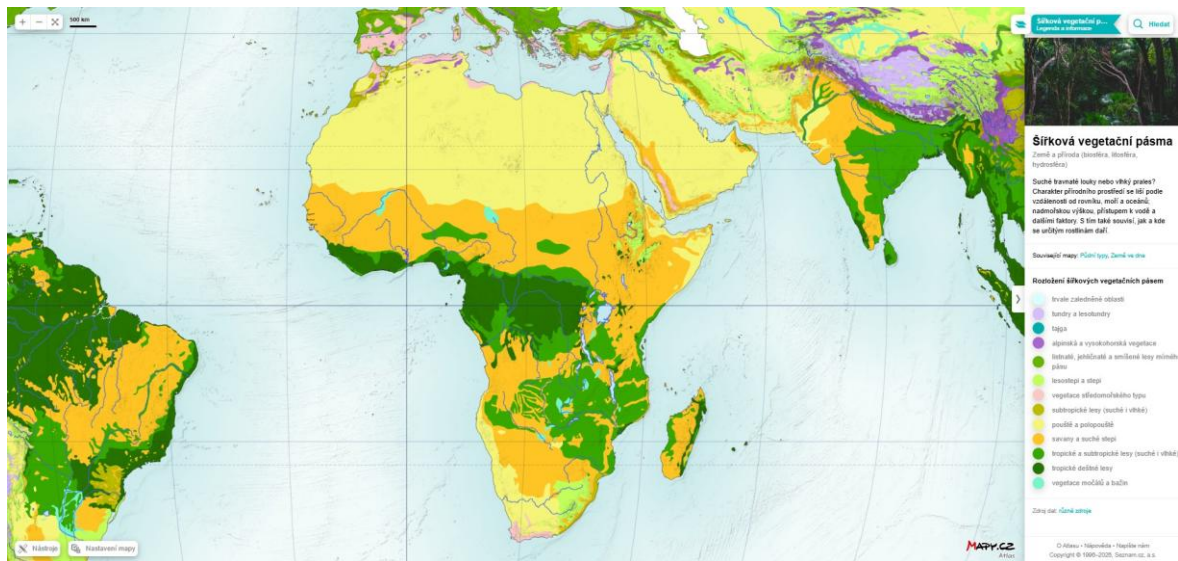
Obrázek 74: Jednoduchý screenshot zájmového území Evropy pro T1 k prvnímu přístupu.

V konečné podobě tak bylo možné získat fixace přiřazené jak do **statického mapového pole** Evropy, tak do **postranního panelu a krátké legendy**. Tento přístup byl vhodný zejména pro situace, kdy participant zůstával v přibližně očekávaném měřítku a nepracoval intenzivně s prvky měnícími obsah mapy. Interaktivní prvky typu *hover* však tímto postupem nebyly samostatně zachyceny. **Obrázek 75** dokumentuje prostředí Tobii Pro Lab při zpracování této úlohy, včetně časové osy, jednotlivých pokusů a přiřazovaných fixací.



Obrázek 75: Ukázka zpracovávání interaktivního atlasu v prostředí Tobii Pro Lab, včetně časové osy a nesprávně přiřazené fixace.

Druhý přístup byl zaměřen na kombinaci **asistovaného mapování a manuálního zaznamenávání interaktivity**, zejména **hoverů**. Byl testován u úlohy **T2** zaměřené na šířková vegetační pásma Afriky. Tato úloha představovala jiný typ problému než T1, protože samotná mapa byla relativně jednoduchá, ale její obsah se často měnil v důsledku interaktivity. Participant mohl přejíždět přes prvky v mapě nebo v legendě, což vyvolávalo **pop-upy** a **zvýraznění** tematických kategorií. Tyto změny byly pro interpretaci práce s mapou podstatné, avšak interakční záznam z nástroje CartoLogger neumožňoval hovers v dostatečné podobě zachytit. Proto byl vytvořen screenshot Afriky včetně postranního panelu a legendy (**Obrázek 76**) a do něj bylo nejprve spuštěno asistované mapování, tedy podobně jako u prvního přístupu. Vzhledem k časté změně obsahu však algoritmus produkoval velké množství chyb. Z tohoto důvodu byla celá úloha následně procházena od začátku do konce **ručně**. Fixace byly kontrolovány, opravovány a doplňovány do referenčního snapshotu a současně byly v Tobii Pro Lab vytvářeny vlastní události (**custom events**) zachycující interaktivní chování participanta.



Obrázek 76: Jednoduchý screenshot zájmového území Afriky pro T2.

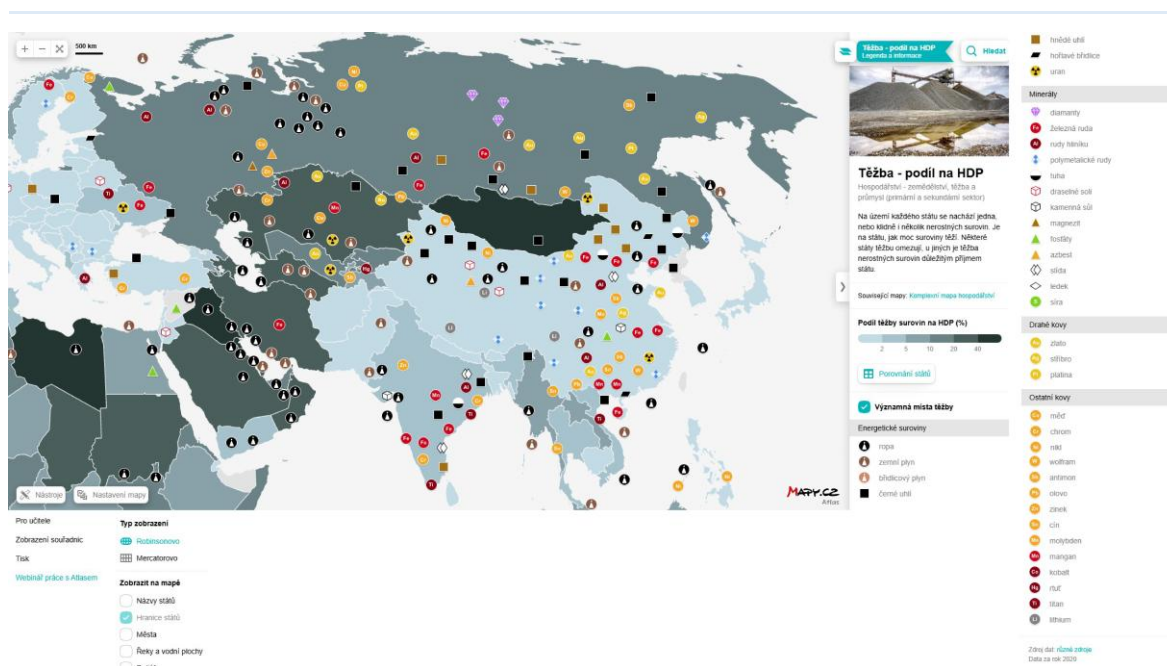
Custom events byly u druhého přístupu vytvořeny ve třech hlavních podobách: kliknutí do legendy, hover v legendě a pop-up v mapě. Pro jednotlivé vegetační kategorie byly zaznamenávány konkrétní eventy, například:

- ↳ *Hover in legend: alpinská a vysokohorská vegetace,*
- ↳ *Hover in legend: lesostepi a stepi,*
- ↳ *Hover in legend: listnaté, jehličnaté a smíšené lesy mírného pásu,*
- ↳ *Hover in legend: pouště a polopouště,*
- ↳ *Hover in legend: savany a suché stepi,*
- ↳ *Hover in legend: subtropické lesy (suché i vlhké),*
- ↳ *Hover in legend: tajga,*
- ↳ *Hover in legend: tropické a subtropické lesy (suché a vlhké),*
- ↳ *Hover in legend: tropické deštné lesy,*
- ↳ *Hover in legend: trvale zaledněné oblasti,*
- ↳ *Hover in legend: tundry a lesotundry,*
- ↳ *Hover in legend: vegetace močálů a bažin*
- ↳ *a Hover in legend: vegetace středomořského typu.*

Stejné tematické kategorie byly zaznamenávány také jako **pop-up v mapě** (tedy namísto slov *hover in legend* byla slova *pop-up in map*). Tento přístup byl tedy výrazně pracnější než první varianta, ale umožnil zachytit složku **interaktivity**, která by při samotném mapování fixací do statického snímku zůstala skryta.

Třetí přístup využíval tzv. **schematické mapování**. Byl testován u úlohy **T4** zaměřené na těžbu zlata v Asii, která představovala složitější mapový stimul s obvyklým zoomováním, častější změnou obsahu, hustým výskytem bodových znaků a vyšší mírou interaktivity. V tomto případě byl vytvořen analytický statický obraz, který již přesně neodpovídal žádnému jednomu okamžiku videozáznamu, ale sloužil jako schéma integrující všechny podstatné části rozhraní

(Obrázek 77). Obsahoval mapové pole v detailnějším zoomu, celý rozbalený postranní panel s úplnou legendou a současně rozbalené nabídky Nástroje a Nastavení mapy.



Obrázek 77: Schematický referenční snímek použitý pro mapování fixací u úlohy T4 zaměřené na těžbu zlata v Asii.

Předpokládalo se, že asistované mapování zde bude fungovat pouze omezeně, protože referenční snímek byl analytickou konstrukcí, nikoliv přímým screenshotem aktuálního stavu rozhraní. Přesto bylo asistované mapování spuštěno, protože v okamžicích, kdy se obsah mapového pole ve videozáznamu podobal vytvořenému schématu, byly některé fixace v mapovém poli i v postranním panelu přiřazeny správně. Na tento automatický výsledek však nebylo možné spoléhat a většina práce spočívala v **ručním zaznačení fixací do schématu**.

U třetího přístupu byly současně zaznamenávány také **interaktivní události** související s tematickou kategorií zlata. Konkrétně šlo o event **Zlato (click)**, který zachycoval trvalé vyfiltrování nebo aktivaci zlata v legendě, dále **Zlato (hover – start)** a **Zlato (hover – end)**, které vymezovaly časový interval, v němž participant pracoval s *hoverem* nad kategorií zlata. Tato kombinace fixací a *custom events* umožnila alespoň částečně rekonstruovat, zda participant sledoval mapové znaky, legendu, postranní panel, nebo interaktivně aktivované prvky. Z metodologického hlediska byl tento přístup nejvíce vzdálen klasickému asistovanému mapování, ale zároveň nejlépe odpovídal situacím, kdy dynamický interaktivní stimul nebylo možné převést do jednoho věrného statického snímku.

Veškeré vytvořené **custom events** byly následně exportovány z Tobii Pro Lab ve formátu **CSV**. Tyto výstupy byly dále importovány a začleněny do vlastního nástroje **MapLogger**, kde byly propojeny s interakčními daty získanými prostřednictvím nástroje **CartoLogger**. Výsledkem byl **jeden sjednocený CSV soubor** obsahující interakce zaznamenané automaticky i manuálně doplněné události z Tobii Pro Lab. Tento postup umožnil doplnit standardní eye-tracking záznam o informace, které nebyly přímo dostupné z automatického logování, zejména o *hover*

a *pop-up* akce a specifické interakce s legendou. Tím vznikl komplexnější datový základ pro interpretaci uživatelského chování v interaktivním atlasu.

U každého z testovaných přístupů byla průběžně zaznamenávána **časová náročnost zpracování**. Pro každého participanta a příslušnou úlohu bylo evidováno, kolik minut zabralo mapování, a to včetně čekání na algoritmus asistovaného mapování, načítání dat, manuální kontroly a ručního doplňování fixací. Aby bylo možné časovou náročnost jednotlivých přístupů porovnat korektněji, byly v Tobii Pro Lab vytvořeny **TOI** pro jednotlivé úlohy a délka každého TOI, tedy skutečná **délka řešení úlohy**, byla vložena do porovnávací tabulky. Kromě délky úlohy byl zahrnut také **počet fixací**, protože bylo zřejmé, že pracnost mapování nezávisela pouze na zvoleném analytickém přístupu, ale také na rozsahu a hustotě zpracovávaného záznamu.

Pro toto porovnání byl navržen **index normalizované náročnosti mapování (INNM)**. Metrika vycházela z principu, že nejprve byla odhadnuta očekávaná délka mapování podle pracovní zátěže daného záznamu, tedy podle délky úlohy a počtu fixací. Poté byla skutečná délka mapování porovnána s touto očekávanou hodnotou. Model měl podobu (**vzorec 4**):

$$\log(M_i) = \alpha + \beta_1 \log(D_i) + \beta_2 \log(F_i) + \varepsilon_i \quad (4)$$

kde M_i představovalo skutečnou délku mapování v minutách, D_i délku úlohy v sekundách a F_i počet fixací. Z modelu byla vypočtena **očekávaná délka mapování** $\hat{M}_i$, vůči níž byla skutečná délka mapování normalizována (**vzorec 5**):

$$INNM_i = \frac{M_i}{\hat{M}_i} \quad (5)$$

Interpretace indexu je však přímočará. Hodnota $INNM = 1,00$ znamenala očekávanou pracnost vzhledem k délce úlohy a počtu fixací. Hodnota $INNM < 1,00$ označovala rychlejší zpracování, než by odpovídalo rozsahu dat, zatímco hodnota $INNM > 1,00$ znamenala pomalejší zpracování, než by odpovídalo délce úlohy a počtu fixací. Korelační analýza potvrdila, že **délka mapování byla skutečně silně navázána na rozsah zpracovávaných dat**. Korelace mezi délkou mapování a délkou úlohy byly **silné** ve všech třech analyzovaných úlohách: u **T1** dosáhla hodnoty ($r = 0,854$), u **T2** hodnoty ($r = 0,785$) a u **T4** hodnoty ($r = 0,854$). Ještě silnější vztah byl zjištěn **mezi délkou mapování a počtem fixací**: u **T1** ($r = 0,889$), u **T2** ($r = 0,838$) a u **T4** ($r = 0,897$). Tyto hodnoty podporují závěr, že delší záznamy a záznamy s vyšším počtem fixací vyžadovaly delší ruční zpracování. Současně je však nutné zdůraznit, že délka úlohy a počet fixací spolu v analyzovaných datech velmi úzce souvisely, a proto je vhodné je interpretovat společně jako ukazatele rozsahu a hustoty zpracovávaného eye-tracking záznamu, nikoliv jako zcela nezávislé příčinné faktory. Výsledky porovnání jednotlivých přístupů jsou shrnuty v **Tabulka 11**.

Tabulka 11: Porovnání efektivity tří přístupů ke zpracování eye-tracking dat z interaktivního atlasu pomocí indexu normalizované náročnosti mapování (INNM)

Přístup / ID úlohy	Počet záznamů	INNM (Ø)	Interpretace	Upravená délka mapování při typické zátěži
Přístup 1 / T1	41	0,854	Nejefektivnější	8,89 min
Přístup 3 / T4	44	1,047	Střední pracnost	10,90 min
Přístup 2 / T2	38	1,123	Nejméně efektivní	12,06 min

Jako typická zátěž byla definována mediánová délka úlohy 89,225 s a mediánový počet 261 fixací napříč všemi validními pozorováními. Pro tuto standardizovanou pracovní zátěž byly pomocí modelu odhadnuty odpovídající délky mapování jednotlivých přístupů. Jako **nejefektivnější** se ukázal **první přístup** použitý u T1, tedy asistované mapování jednoduššího mapového stimulu, jehož geometrický průměr INNM činil 0,854. Modelově odhadnutá délka mapování při typické zátěži odpovídala 8,89 min. Druhý nejlepší výsledek vykázal třetí přístup použitý u T4, tedy schematické mapování, s hodnotou INNM 1,047 a odhadnutou délkou mapování 10,90 min. Nejméně efektivní byl druhý přístup použitý u T2, kombinující mapování fixací s podrobným manuálním zaznamenáváním akcí typu *hover* a *pop-up*, kde INNM dosáhl hodnoty 1,123 a odhadnutá délka mapování činila 12,06 min. Tento výsledek metodologicky odpovídal vyšší komplexitě druhého přístupu, který vyžadoval nejen kontrolu a opravy fixací, ale také průběžné zaznamenávání většího množství *custom events*.

Analýza interaktivního atlasu tedy ukázala, že převod eye-tracking dat z dynamického kartografického stimulu do statického obrazu je možný, ale pouze za cenu výrazné metodologické redukce a značné manuální práce. **Asistované mapování** mohlo být použitelné u jednodušších situací, zejména pokud byl mapový obsah stabilní a participant neprováděl rozsáhlé změny měřítka nebo obsahu. **Mozaikový přístup** poskytl částečně funkční řešení pro globální mapy, u nichž bylo potřeba zachovat detailnější obsah v jednom sjednoceném obrazu. **Schematické mapování** se ukázalo jako využitelné v případech, kdy cílem nebylo zachytit pouze přesnou geografickou polohu fixace, ale také vztah mezi mapovým polem, legendou, postranním panelem a interaktivními prvky rozhraní. Žádný z těchto přístupů však nepředstavoval univerzální řešení. Z praktického hlediska se jako klíčové ukázalo kombinovat mapování fixací s dalšími datovými zdroji, zejména s interakčními logy, *custom events* a verbálními projevy participantů získanými metodou talk-aloud. Teprve propojení těchto dat umožnilo interpretovat chování uživatele v interaktivním atlasu dostatečně průkazným způsobem.

CartoLogger – nástroj pro logování URL změn

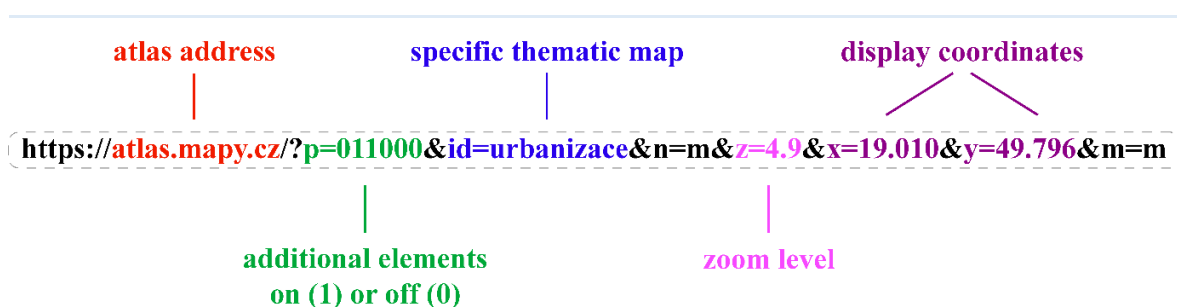
Vzhledem k problémům spojeným s přímým přiřazováním fixací z interaktivního atlasu do statického snímku bylo již ve fázi přípravy experimentu zřejmé, že samotný eye-tracking záznam nebude pro interpretaci práce uživatelů s webovým atlasem dostačující. U interaktivního mapového prostředí nebylo možné spolehlivě určit význam fixace pouze ze souřadnice obrazovky, protože obsah mapového pole se v průběhu řešení úlohy měnil v závislosti na měřítku, poloze mapy, zvoleném tématu a aktivovaných prvcích uživatelského rozhraní. Z tohoto důvodu byl pro část experimentu s interaktivním atlasem doplněn samostatný záznam uživatelských interakcí. Pro tyto účely bylo vytvořeno vlastní rozšíření pro prohlížeč **Google Chrome** s názvem **CartoLogger**⁴², jehož autorkou byla Mgr. Michaela Vojtěchovská. Nástroj byl vyvinut jako podpůrný prostředek pro zaznamenávání **změn stavu** webového atlasu *Mapy.cz* během řešení úloh a jeho použití umožnilo získat datovou vrstvu, která doplňovala eye-tracking záznam o objektivně zaznamenané interakční chování uživatele. Výhodou řešení založeného na rozšíření webového prohlížeče bylo, že nebylo nutné zasahovat do zdrojového kódu testované atlasové aplikace. CartoLogger pracoval nad již existujícím

⁴² Vojtěchovská, Michaela. *CartoLogger* [software]. Online. GitHub, [b. r.]. [cit. 2026-05-12]. Dostupné z: <https://github.com/misavojte/CartoLogger>

webovým atlasem a zaznamenával interakce realizované v prostředí prohlížeče. Konkrétně ukládal **kliknutí, posuny mapy, změny měřítka a změny URL adresy**, tedy události, které přímo souvisely se změnou zobrazeného kartografického obsahu. Jednotlivé záznamy byly ukládány do databáze prohlížeče pomocí nativního rozhraní *IndexedDB*. Jedná se o nízkoúrovňové aplikační rozhraní určené pro klientské ukládání většího množství strukturovaných dat, včetně možnosti indexování pro efektivnější vyhledávání; současně jde o objektově orientovanou databázi v prostředí jazyku JavaScript, která umožňuje ukládat a načítat objekty pomocí klíčů⁴³. V kontextu této studie šlo o vhodné řešení, protože záznam interakcí mohl probíhat lokálně během experimentu, bez nutnosti serverové infrastruktury a bez přímé úpravy testované mapové aplikace.

Každý záznam vytvořený nástrojem CartoLogger obsahoval **časové razítko** v unixovém čase, **identifikaci participanta**, stav mapy uložený v **URL adrese** a **typ provedené akce**. Tato kombinace informací umožnila rekonstruovat průběh práce participanta s interaktivním atlasem v čase, především z hlediska toho, kdy docházelo ke změně měřítka, posunu mapy, přepnutí tematické mapy nebo jiné změně stavu rozhraní. Výstupní data bylo možné exportovat ve formátu CSV. To pak umožnilo jejich další zpracování mimo prostředí prohlížeče a jejich propojení s dalšími datovými zdroji, zejména s časovými intervaly úloh, eye-tracking daty a ručně vytvořenými událostmi v Tobii Pro Lab.

Klíčovou informací zaznamenávanou nástrojem CartoLogger byla **URL adresa atlasu**, protože v případě atlasu *Mapy.cz* obsahovala více parametrů popisujících aktuální stav mapového zobrazení. Jak ukazuje **Obrázek 78**, z URL adresy bylo možné odvodit nejen samotnou adresu atlasu, ale také informaci o zapnutí nebo vypnutí doplňkových prvků, identifikátor konkrétní tematické mapy, úroveň přiblížení a souřadnice aktuálního zobrazení. Například parametr *id* vyjadřoval zvolenou tematickou mapu, parametr *z* úroveň zoomu a parametry *x* a *y* aktuální zobrazované souřadnice. Tím URL adresa neplnila pouze technickou roli odkazu na webovou stránku, ale představovala kompaktní záznam aktuálního stavu interaktivní mapy. Právě tato vlastnost byla pro analýzu zásadní, protože umožňovala zpětně určit, v jakém měřítku, nad jakým územím a nad jakým tematickým obsahem participant v daném čase pracoval.



Obrázek 78: Příklad struktury URL adresy webového atlasu Mapy.cz s parametry využitelnými pro analýzu stavu mapového zobrazení, zejména tematické mapy, zapnutí doplňkových prvků, úrovně přiblížení a souřadnic aktuálního výřezu.

⁴³ **MDN Contributors.** *IndexedDB API* [online]. MDN Web Docs, 3. 4. 2025 [cit. 2026-05-12]. Dostupné z: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/IndexedDB_API

Zaznamenávání URL změn mělo význam také z hlediska možného budoucího georeferencování fixací. Pokud je u každého časového okamžiku nebo interakční události znám aktuální stav mapy, tedy zejména měřítko, rozsah a poloha zobrazení, lze teoreticky zpětně převádět fixace ze souřadnic obrazovky do geografického nebo alespoň mapového prostoru. V této případové studii nebylo úplné georeferencování fixací hlavním výstupem, avšak záznam URL parametrů vytvořil datový základ pro tento typ navazující analýzy. CartoLogger tak představoval **mezikrok** mezi čistě vizuální analýzou eye-tracking záznamu a plně prostorově vztaženým zpracováním pohledu nad dynamickým kartografickým obsahem.

V praktickém průběhu experimentu byly prostřednictvím nástroje CartoLogger zaznamenány **URL změny a základní interakce** u všech participantů v části s interaktivním atlasem. Po skončení testování byly jednotlivé záznamy exportovány do CSV souborů a dále zpracovány společně s dalšími výstupy. Na základě těchto dat byl následně upraven autorův vlastní nástroj MapLogger, původně vyvíjený pro pozdější případovou studii PS5, tak, aby umožnil importovat také interakční záznamy pocházející právě z nástroje CartoLogger. Tím bylo možné získat přehlednější strukturu dat o průběhu interakcí a připravit je pro další analytické využití.

Samotná interakční data z nástroje CartoLogger však **nepokrývala všechny typy** uživatelského chování, které byly pro interpretaci práce s interaktivním atlasem relevantní. Problematické byly zejména akce typu *hover*, *pop-up* a některé krátkodobé stavy rozhraní, které se ve standardním URL záznamu neprojeví. Proto byly, jak bylo popsáno v předchozí části, v prostředí Tobii Pro Lab ručně vytvářeny doplňkové **custom events**. Tyto události zachycovaly například *hover* nad položkou legendy, zobrazení *pop-up* okna v mapě nebo kliknutí na konkrétní tematickou kategorii. Po exportu z Tobii Pro Lab byly tyto *custom events* importovány do upraveného prostředí nástroje MapLogger a propojeny s daty z nástroje CartoLogger. Výsledkem byl sjednocený CSV soubor, který obsahoval automaticky zaznamenané interakce z prohlížeče i ručně doplněné události vztahující se k interaktivním prvkům, jež nebylo možné zachytit pouze prostřednictvím změn URL.

Tímto postupem vznikl úplnější balíček dat reprezentující interaktivní chování participantů při práci s webovým atlasem. Zatímco eye-tracking data poskytovala informaci o tom, kam participant vizuálně směřoval pozornost, CartoLogger doplňoval informaci o tom, jak se v čase měnil stav mapového prostředí. Dále *custom events* z Tobii Pro Lab umožnily zachytit jemnější interakce, které byly analyticky významné, ale nebyly přímo uloženy v URL nebo nebyly standardně logovány. Kombinace těchto tří vrstev – fixací, URL/interakčních záznamů a ručně vytvořených událostí – poskytla podstatně robustnější základ pro interpretaci práce s interaktivním atlasem než samotný eye-tracking záznam. CartoLogger tak v této případové studii plnil roli podpůrného metodologického nástroje, který umožnil částečně překlenout základní omezení analýzy eye-tracking dat nad dynamickým kartografickým stimulem.

MapLogger

Pro další zpracování interakčních dat a jejich explorativní analýzu byl využit vlastní nástroj **MapLogger**⁴⁴, vyvinutý autorem disertační práce původně zejména pro potřeby pozdější případové studie PS5. V kontextu této případové studie však byl MapLogger zpětně rozšířen také o možnost práce s daty pořízenými nástrojem CartoLogger. Podrobnější popis celé sady MapLogger, její architektury, hlavních komponent a možností využití je uveden až v části věnované případové studii PS5. V této kapitole je proto pozornost zaměřena pouze na tu část nástroje, která byla vytvořena a využita pro zpracování dat z interaktivního atlasu v PS3, tedy zejména na záložku „CartoLogger“. Nástroj **MapLogger Suite** je koncipován jako klientský, plně prohlížečový nástroj, jehož hlavními částmi jsou Builder, Analyser a **rozšířená část pro práci s výstupy z nástroje CartoLogger**; navíc vše probíhá lokálně v prohlížeči bez nutnosti serverového zpracování.

Záložka „CartoLogger“ byla v této fázi nastavena specificky pro potřeby experimentu s interaktivním atlasem *Mapy.cz*. Jejím účelem bylo načíst CSV soubory exportované z nástroje CartoLogger, převést je do jednodušší podoby a umožnit jejich základní vizuální i tabulkové zhodnocení. MapLogger v této části neplnil roli definitivního analytického systému, ale spíše nástroje pro **rychlou kontrolu, transformaci** a prvotní **interpretaci interakčních dat**. Po nahrání dat bylo možné pracovat buď s agregovaným souborem všech participantů, nebo s daty vybraného participanta. Tím bylo možné porovnávat obecné vzorce interakčního chování napříč souborem i podrobněji rekonstruovat průběh práce konkrétní osoby. Část CartoLogger je zaměřena zejména na *URL-based interaction traces*, především na události typu *url_change*, a vysvětluje změny mezi po sobě následujícími URL adresami, například změnu zoomu, mapové vrstvy, souřadnic a dalších parametrů.

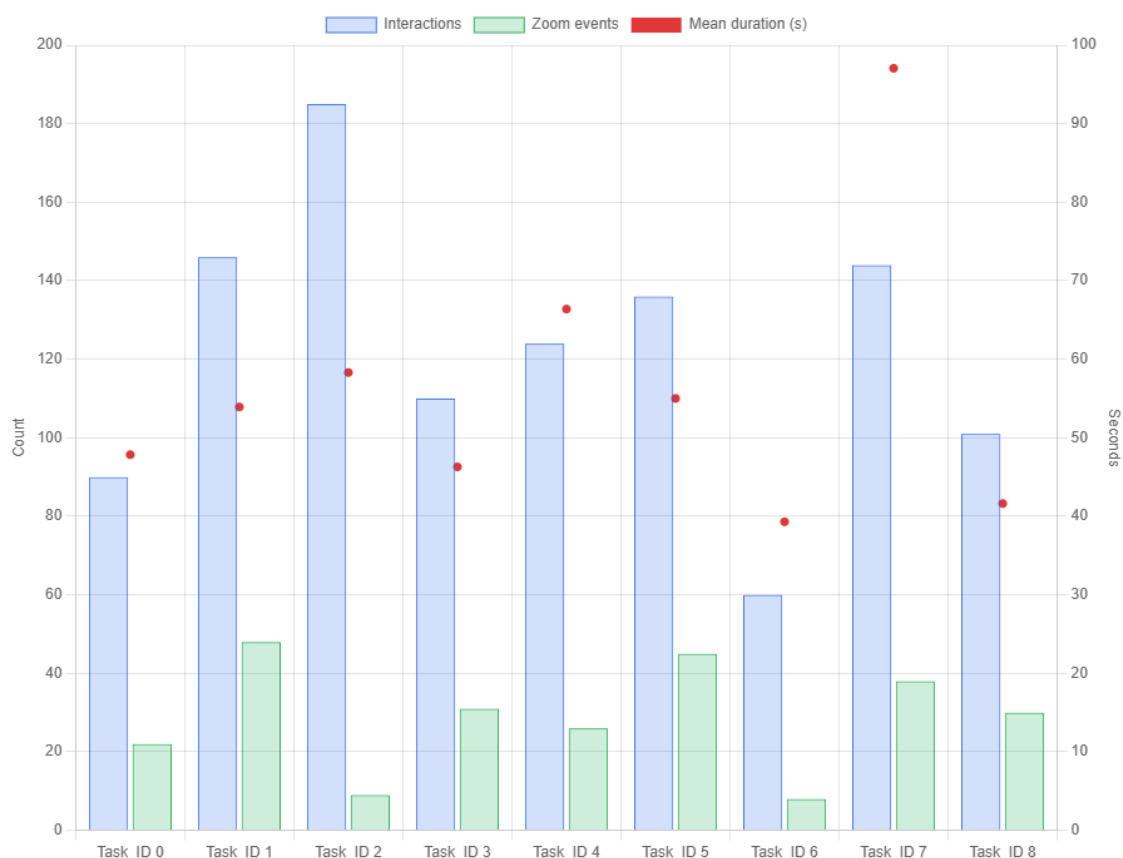
Důležitou úpravou bylo automatické vytvoření proměnné *task_ID*. Vzhledem k tomu, že pořadí úloh bylo v experimentu randomizováno, nebylo možné interpretovat interakce pouze podle jejich pořadí v záznamu nebo původního označení relace. MapLogger proto převáděl vstupní data do „taskově“ orientované struktury, v níž byly interakce přiřazeny ke konkrétním úlohám podle předem definovaných pravidel. Konvertor v části CartoLogger mimo jiné přejmenovává *session* na *participant_ID*, počítá *task_ID* z posledního *url_change* v původní úloze, odstraňuje vybrané technické události a odvozuje nové sloupce, například ***parameter***, ***zoom***, ***map***, ***click*** a ***projection***. Tento krok byl pro analýzu zásadní v tom, že umožnil korektně vytvářet vizualizace po úlohách bez ohledu na to, v jakém pořadí byly jednotlivým participantům úlohy předkládány.

V této fázi byl MapLogger dále nastaven tak, aby bylo možné ke vstupním datům z nástroje CartoLogger přiřadit také ručně vytvořené ***custom events*** z prostředí Tobii Pro Lab. Výsledkem byla jednotná datová struktura, která spojovala automaticky logované změny mapového prostředí s ručně doplněnými událostmi z eye-tracking softwaru. Praktickou výhodou tohoto řešení bylo, že z nástroje MapLogger bylo možné stáhnout **jeden sjednocený CSV soubor**, v němž byla interakční data připravena pro další filtrování, kontrolu a navazující analýzu. Tento export byl následně dále upraven v prostředí Microsoft Excel, kde byly aplikovány filtry a upraven vizuální vzhled tabulky tak, aby bylo možné rychle vybírat

⁴⁴ **Vaníček, Tomáš.** *MapLogger – Suite* [software]. Verze 1.0.3. Online. Olomouc: Katedra geoinformatiky, Univerzita Palackého v Olomouci, 15. 4. 2026 [cit. 2026-05-12]. Dostupné z: <https://vanicektomas.github.io/maplogger/>

například interakce vztahující se ke konkrétní úloze, konkrétnímu participantovi nebo určitému typu události.

MapLogger současně umožnil vytvářet **základní vizualizace** přímo z dat pořízených nástrojem CartoLogger. Tyto vizualizace sloužily především k prvotnímu porozumění datům, kontrole jejich struktury a identifikaci rozdílů mezi úlohami. V záložce CartoLogger jsou dostupné například přehledy typů událostí, cíle kliknutí, interakce v čase, souhrny interakcí po úlohách, využití map podle URL parametru *id*, matice přechodů mezi mapami, čas do první akce a rekonstrukce sekvence chování participanta. Příkladem je vizualizace „Per-task_ID interactions, zoom events, and duration“ (**Obrázek 79**), v níž sloupce zobrazují celkový počet interakcí a zoom událostí a bodové hodnoty vyjadřují průměrnou délku úlohy v sekundách. V grafu jsou pro jednotlivé úlohy porovnány počty zaznamenaných interakcí, počty zoom událostí a průměrná délka řešení úlohy. Takový výstup umožnil rychle identifikovat, které úlohy vyvolávaly vyšší míru interakční aktivity, u kterých participantům více záleželo na změnách měřítka a které úlohy byly časově náročnější.



Obrázek 79: Příklad vizualizace automaticky vytvořené v prostředí MapLogger ze záznamů nástroje CartoLogger; graf porovnává počet interakcí, počet zoom událostí a průměrnou délku řešení jednotlivých úloh pro prvních pět participantů.

Význam nástroje MapLogger v této případové studii spočíval především v tom, že umožnil **převést** jinak obtížně interpretovatelné záznamy URL změn do struktury vhodné pro analytickou práci. Samotný CSV export z nástroje CartoLogger obsahoval detailní časové

záznamy, ale bez dalšího zpracování bylo obtížné rychle vyhodnotit, jak se participant v atlasu pohyboval, kdy měnil měřítko, kdy přecházel mezi tematickými mapami a jak tyto akce souvisely s konkrétními úlohami. Po importu do nástroje MapLogger bylo možné interakční chování rekonstruovat v časové posloupnosti a současně jej sumarizovat podle úloh a participantů. To bylo podstatné zejména proto, že analýza interaktivního atlasu nebyla založena pouze na fixacích, ale na kombinaci více datových vrstev: eye-tracking záznamu, URL změn z nástroje CartoLogger, ručně doplněných *custom events* a případně také slovních projevů participantů.

V této podobě tedy MapLogger představoval experimentální a případově specificky upravený nástroj, který ukázal praktickou možnost propojení logovaných interakcí s dalšími daty vznikajícími při eye-tracking testování IKV. Záložka „CartoLogger“ byla v době zpracování nastavena přímo pro tuto případovou studii, a proto ji nelze chápat jako univerzální hotové řešení pro libovolnou webovou mapovou aplikaci. Zároveň však ukázala obecný princip, který je možné dále rozvíjet: pokud jsou dostupná interakční data v dostatečně strukturované podobě, lze MapLogger upravit podle konkrétního experimentálního designu, struktury vstupních souborů i analytických potřeb výzkumníka. V rámci PS3 tak MapLogger nesloužil pouze jako doplňkový vizualizační nástroj, ale jako prostředek pro zpřehlednění a sjednocení dat, na jejichž základě bylo možné lépe rekonstruovat interakční chování participantů při práci s webovým atlasem.

Dodatečná korelační analýza eye-tracking dat

V návaznosti na předchozí zpracování interaktivního atlasu a porovnání časové náročnosti jednotlivých přístupů k mapování fixací byla provedena **dodatečná korelační analýza** vybraných interakčních a eye-tracking proměnných. Jejím cílem bylo ověřit, do jaké míry **délka mapování fixací** souvisela s objektivním **rozsahem zpracovávaných dat**, tedy zejména s délkou řešení úlohy, počtem fixací, počtem zaznamenaných interakcí a počtem změn měřítko mapy. Tato analýza byla celkově důležitá z metodologického hlediska, protože samotná délka mapování nemusela odrážet pouze efektivitu zvoleného analytického přístupu, ale také velikost a složitost konkrétního záznamu. Delší úloha přirozeně obsahovala více časového materiálu ke kontrole a zpravidla také více fixací, interakcí a stavových změn mapového prostředí. Bez zohlednění těchto vztahů by proto mohlo dojít k mylné interpretaci, že určitý přístup byl méně efektivní, ačkoliv ve skutečnosti pouze zpracovával rozsáhlejší nebo hustší záznam.

Pro úplnější posouzení vztahů mezi proměnnými byly vypočteny *Pearsonovy korelační koeficienty*, *Spearmanovy pořadové korelace* a jednoduché *párové lineární modely*. Pearsonův koeficient byl využit pro zachycení lineárního vztahu mezi proměnnými, zatímco Spearmanova korelace sloužila jako doplňkový robustnější ukazatel pořadové závislosti, který je méně citlivý na odlehle hodnoty a přesný tvar rozdělení dat. Jednoduché lineární modely byly použity jako explorační nástroj pro posouzení, jak velkou část variability jedné proměnné lze vysvětlit jinou proměnnou. Výsledky byly interpretovány opatrně, protože cílem nebylo prokazovat kauzalitu, ale popsat strukturu vztahů mezi proměnnými, které vstupovaly do hodnocení pracnosti mapování fixací. Zároveň byla při interpretaci zohledněna *Bonferroniho korekce* na vícenásobné testování, aby nebyly za robustní považovány vztahy, které mohly být statisticky významné pouze v důsledku většího počtu provedených testů.

Napříč všemi analyzovanými úlohami se nejstabilněji projevoval vztah mezi **časovými charakteristikami úlohy a počtem fixací**. Tento výsledek byl metodologicky očekávatelný, protože delší doba expozice úloze přirozeně poskytovala větší časový prostor pro vznik vyššího počtu fixací. Z toho vyplývá důležité interpretační omezení, že absolutní počet fixací nelze bez další normalizace chápat jako přímý indikátor vyšší kognitivní náročnosti nebo intenzivnější vizuální pozornosti. Vyšší počet fixací může být do značné míry prostým důsledkem toho, že participant nad úlohou strávil delší dobu. Pro přesnější interpretaci je proto vhodné absolutní počet fixací doplňovat relativizovanými metrikami, například počtem fixací vztaženým k délce řešení úlohy nebo jiným časově normalizovaným ukazatelem.

U **T1** byly zjištěny velmi silné kladné vztahy mezi **délkou úlohy a počtem fixací**, mezi **délkou mapování a počtem fixací** a také mezi **délkou mapování a délkou úlohy**. Konkrétně vztah mezi délkou úlohy a počtem fixací dosáhl hodnot $r = 0,904$, $p = 0,928$, $p < 0,001$. Vztah mezi délkou mapování a počtem fixací dosáhl hodnot $r = 0,889$, $p = 0,912$, $p < 0,001$, zatímco vztah mezi délkou mapování a délkou úlohy činil $r = 0,854$, $p = 0,882$, $p < 0,001$. Tyto výsledky ukázaly, že pracnost mapování u této úlohy byla velmi úzce spjata s rozsahem záznamu. Velmi těsný vztah byl zjištěn také mezi počtem zoomů a celkovým počtem interakcí ($r = 0,936$, $p = 0,963$, $p < 0,001$), což naznačuje, že **změny měřítko tvořily významnou složku celkové interakční aktivity**. Slabší vztah mezi délkou mapování a počtem interakcí byl sice statisticky významný před korekcí ($r = 0,339$, $p = 0,035$), po Bonferroniho korekci však již průkazný nebyl. Tento vztah proto nelze považovat za robustní a je vhodné jej interpretovat pouze jako slabý náznak možné souvislosti.

U **T2** se vztahy mezi proměnnými projevily nejvýrazněji, a to také z důvodu časové náročnosti během mapování fixací a ručního zaznamenávání interaktivity (*custom events*). Nejsilnější závislost byla zjištěna **mezi délkou úlohy a počtem fixací** ($r = 0,989$, $p = 0,946$, $p < 0,001$), přičemž jednoduchý lineární model vysvětloval přibližně 97,9 % variability počtu fixací. Tento výsledek potvrzuje, že počet fixací byl v této úloze téměř přímo navázán na délku řešení. Silné vztahy byly dále zjištěny mezi **počtem zoomů a počtem interakcí** ($r = 0,951$, $p = 0,942$, $p < 0,001$), mezi **délkou úlohy a počtem interakcí** ($r = 0,828$, $p < 0,001$), mezi **počtem interakcí a počtem fixací** ($r = 0,829$, $p < 0,001$) a mezi **délkou mapování a počtem fixací** ($r = 0,838$, $p < 0,001$). Na rozdíl od T1 a T4 zde tedy interakční proměnné výrazněji souvisely nejen mezi sebou, ale také s délkou řešení a počtem fixací. Tohle tak může naznačovat vyšší provázanost časové náročnosti, interakční aktivity a vizuální explorace v této úloze. Vzhledem k explorační povaze analýzy je však vhodné tento závěr formulovat pouze jako interpretační hypotézu, nikoliv jako tvrzení o příčinném mechanismu.

U **T4** se opět potvrdily především vztahy mezi **časovými proměnnými a počtem fixací**. **Délka úlohy** velmi silně korelovala **s počtem fixací** ($r = 0,958$, $p = 0,952$, $p < 0,001$), **délka mapování** korelovala **s počtem fixací** ($r = 0,897$, $p = 0,828$, $p < 0,001$) a také **s délkou úlohy** ($r = 0,854$, $p = 0,811$, $p < 0,001$). Velmi silný vztah byl zjištěn rovněž mezi **počtem zoomů a celkovým počtem interakcí** ($r = 0,933$, $p = 0,933$, $p < 0,001$). Slabší vztahy mezi délkou úlohy a počtem interakcí ($r = 0,375$, $p = 0,019$) a mezi počtem interakcí a počtem fixací ($r = 0,391$, $p = 0,014$) nebyly po korekci na vícenásobné testování dostatečně robustní. Podobně jako u T1 proto nelze tyto slabší souvislosti považovat za stabilní výsledek.

Celkově lze konstatovat, že počet fixací byl ve všech analyzovaných úlohách velmi úzce svázán s délkou řešení úlohy. Tento výsledek je důležitý pro interpretaci eye-tracking metrik, protože

ukazuje, že absolutní počet fixací je silně časově podmíněná proměnná. Vhodnější je proto pracovat s relativizovanými ukazateli nebo kombinovat počet fixací s dalšími informacemi, například s typem interakcí, průběhem řešení, slovním komentářem participanta a charakterem použité mapy.

Dále se ukázalo, že **počet zoomů a celkový počet interakcí** byly ve všech úlohách velmi těsně **propojeny**. Tento výsledek je metodologicky významný pro případné vícerozměrné modelování, protože současné zařazení obou proměnných jako nezávislých prediktorů by mohlo vést k problému kolinearity. Jinými slovy, počet zoomů a celkový počet interakcí nesou z velké části překrývající se informace o interakční aktivitě participanta. Při dalších analýzách by proto bylo vhodné buď vybrat jednu z těchto proměnných, nebo použít takový modelový přístup, který vzájemnou závislost prediktorů výslovně zohlední.

Nejvýraznější rozdíl mezi analyzovanými úlohami představoval T2, u nějž byly časové, interakční i fixační charakteristiky propojeny silněji než u T1 a T4. Tento výsledek pravděpodobně souvisel s charakterem samotné úlohy, v níž se více uplatňovala práce s interaktivními prvky, změnami obsahu a vizuálním ověřováním tematických kategorií. Vyšší interakční aktivita zde tedy více souvisela s delším řešením a vyšším počtem fixací. Tento závěr však nelze chápat kauzálně; vhodnější je interpretovat jej jako hypotézu o odlišném charakteru řešení dané úlohy, kterou by bylo možné dále ověřovat podrobnější kvalitativní analýzou videozáznamů, interakčních sekvencí a verbálních projevů participantů.

Dodatečná korelační analýza tak potvrdila, že **délka mapování fixací** byla významně provázána především s **délkou řešení úlohy** a **počtem fixací**, tedy s rozsahem dat, která musela být zpracována. V případě T2 se navíc výrazněji projevila také souvislost s **počtem interakcí**, což odpovídalo její vyšší interakční komplexitě. Tyto výsledky poskytly důležité zdůvodnění pro použití normalizované metriky **INNM**, která při porovnávání přístupů nezohledňovala pouze samotnou naměřenou délku mapování, ale vztahovala ji k očekávané pracnosti vyplývající z délky úlohy a počtu fixací. Korelační analýza tedy nepředstavovala samostatný hodnoticí výstup, ale podpůrný krok, který pomohl ověřit, že rozdíly v pracnosti jednotlivých analytických přístupů je nutné interpretovat v kontextu rozsahu a hustoty zpracovávaného eye-tracking záznamu.

Lingvistická analýza

Vedle eye-tracking dat, interakčních záznamů a časových charakteristik úloh vznikla v rámci případové studie také rozsáhlá sada **verbálních dat participantů** získaných metodou **talk-aloud**. Participantů během řešení úloh odpovídali nahlas a jejich slovní projevy byly zaznamenávány společně s průběhem experimentu. Tato datová vrstva představuje významný doplněk k analýze očních pohybů, protože umožňuje zachytit nejen to, kam se participant díval, ale také jakým způsobem o mapě hovořil, jak formuloval prostorové vztahy, které objekty nebo jevy považoval za relevantní a zda jeho odpověď měla spíše charakter prostého popisu, nebo interpretace prostorového rozložení. Možnost využití verbálních projevů participantů byla v širším metodologickém rámci studie spojena s výzkumem extrakce informací z mapy, tedy s otázkou, jak uživatel mapový obsah vnímá, dekóduje, strukturuje a převádí do slovní odpovědi. Tato problematika byla rozvíjena také v rámci spolupráce s Katedrou obecné lingvistiky UP, konkrétně s doktorandem Mgr. Zdeňkem Jouklem. V rámci této spolupráce byl prezentován příspěvek na mezinárodní konferenci EuroCarto 2024, který byl zaměřen na kognitivní struktury při extrakci mapových informací (Beitlova a kol., 2024).

Z hlediska zaměření disertační práce však lingvistická složka **nepředstavuje hlavní analytickou linii** této případové studie. Autor disertační práce se soustředil především na možnosti zpracování eye-tracking dat, asistované a schematické mapování fixací, propojení dat s interakčními záznamy a metodologické limity analýzy dynamického kartografického stimulu. Lingvistická analýza byla proto v této fázi řešena **pouze okrajově** a spíše jako perspektivní směr dalšího zpracování rozsáhlé datové baterie. Všechny výpovědi participantů již byly **převedeny do textové podoby** s využitím nástroje **Sonix**⁴⁵, avšak samotnou transkripci neprováděl autor disertační práce. Jeho role spočívala pouze v dílčí kontrole vybraných přepisů a v ověření, zda transkribované texty odpovídaly základním požadavkům pro další potenciální analýzu. Kontrolní poznámky ukázaly, že v některých prepisech bylo nutné opravit konkrétní výrazy, například záměnu „*pod Prahou*“ za „*pod dopravou*“, „*ukázka*“ za „*otázka*“ nebo „*do Evropy*“ za „*z Evropy*“, a zároveň upozornily na problém nesouladu počtu speakerů a jejich rolí. Při kontrole přepisů se zároveň ukázalo, že automatická transkripce byla v některých ohledech překvapivě kvalitní, zejména u geografických názvů. Bylo také zjištěno, že i v případech, kdy participant geografický název vyslovil nepřesně, byl přepis často převeden do správné standardizované podoby, například u názvů *Guadalajara* nebo *Galdhøpiggen*. Současně však byla identifikována důležitá metodologická komplikace v tom, že nahrávky obsahovaly také instrukce operátora, které by při automatické lingvistické analýze mohly zkreslovat výsledky. Před jakýmkoliv kvantitativním nebo strojově podporovaným zpracováním textů by proto bylo nutné nejprve oddělit výpovědi participantů od instrukcí výzkumníka, případně jednoznačně označit role jednotlivých mluvčích. Tento požadavek je pak zásadní zejména u frekvenčních analýz, sémantického síťování nebo sekvenční analýzy, protože zahrnutí instrukcí operátora by mohlo vést k umělému navýšení četnosti některých slov a k mylnému obrazu o tom, jak participant mapu skutečně popisovali.

Z teoretického hlediska lingvistická část navazovala na širší otázku, jakým způsobem uživatelé extrahují informace z mapy. Ve zmíněném konferenčním příspěvku (Beitlova a kol., 2024) bylo také autory zdůrazněno, že proces tvorby map je v kartografii dlouhodobě systematicky popsán, zatímco proces získávání informací z mapy je popsán méně úplně. Tento proces přitom zahrnuje zrakovou percepci, rozpoznávání vzorů, pozornost a výběr, dekodování znaků a další kognitivní mechanismy. Současně byl akcentován význam vztahů mezi mapovými znaky, protože právě tyto vztahy se podílejí na utváření prostorových představ uživatele. Z tohoto pohledu verbální projevy participantů představují cenný materiál, protože mohou ukázat, zda uživatelé při popisu mapy vycházejí z jednotlivých izolovaných znaků, z prostorových vzorců, z regionálních vztahů, z gradace hodnot, z kontrastů mezi územími, nebo z obecnějších geografických znalostí.

Jednou z možností dalšího zpracování by byla **frekvenční analýza textu**, která by umožnila zjistit, jaké pojmy, geografické objekty, prostorové relace a tematické kategorie participanté při popisu map nejčastěji používali. V kontextu úloh zaměřených na popis prostorového rozložení jevů by bylo možné sledovat například četnost výrazů označujících světové strany, kontinenty, regiony, státy, jádrové a periferní oblasti, prostorovou koncentraci, rozptýlení, pásmovitost, gradient nebo extrémní hodnoty. Frekvenční analýza by však sama o sobě byla pouze základní úrovní zpracování, protože by ukázala, která slova se v odpovědích objevovala, nikoliv nutně

⁴⁵ **Sonix, Inc.** *Sonix* [software]. Online. San Francisco: Sonix, Inc., 2026 [cit. 2026-05-12]. Dostupné z: <https://sonix.ai/>

to, jak byly významově propojeny. Proto se nabízí její rozšíření o tzv. pyramidální model nebo jiný hierarchický přístup, který by umožnil rozlišit nejběžnější slovní zásobu, odbornější geografické pojmy, prostorové konstrukce a komplexnější interpretační výroky.

Další možností by byla **sémantická analýza textu**, která by se zaměřila na vztahy mezi pojmy a na to, jak participant strukturovali informaci získanou z mapy. V tomto směru by bylo možné navázat na koncept sémantického mapování a sémantických sítí, které byly ve zmíněném konferenčním příspěvku (Beitlova a kol., 2024) představeny jako jedna z cest k porozumění procesu extrakce informací z mapy. Prakticky by to znamenalo analyzovat, jak participant spojovali konkrétní území s konkrétními vlastnostmi, jak vytvářeli vztahy typu „vyšší hodnoty se nacházejí v...“, „jev se soustřeďuje kolem...“, „směrem k jihu ubývá...“, nebo „nejvýraznější oblastí je...“. Takový postup by mohl odlišit odpovědi založené na prostém výčtu oblastí od odpovědí, které obsahovaly skutečnou interpretaci prostorového uspořádání.

Významný potenciál má také **sekvenční analýza výpovědí**. Ta by nesledovala pouze výsledný obsah odpovědi, ale pořadí, v jakém participant jednotlivé informace uváděl. V návaznosti na eye-tracking data by bylo možné zkoumat, zda se tok výpovědi shodoval s tokem vizuální pozornosti, tedy zda participant nejprve hovořil o oblastech, na které se skutečně díval, nebo zda formuloval odpověď spíše na základě předchozích znalostí a mapový obsah používal pouze k ověřování. Sekvenční analýza by mohla zachytit také rozdíly mezi strategiemi typu „od obecného ke konkrétnímu“, „od dominantních oblastí k okrajovým“, „od legendy k mapě“, nebo naopak „od mapového pole k dodatečné interpretaci pomocí legendy“. Takové propojení verbálních sekvencí s fixacemi, interakcemi a časovým průběhem řešení by mohlo významně rozšířit interpretaci uživatelského chování nad rámec samostatných eye-tracking metrik.

Specificky kartograficky relevantní by bylo také **hodnocení schopnosti participantů vyjadřovat se v geografických souvislostech**. Úlohy byly formulovány jako popis prostorového rozložení jevů, a proto by bylo možné analyzovat, zda participant skutečně popisovali prostorové vztahy, nebo pouze vyjmenovávali jednotlivé lokality. V tomto směru by bylo možné sledovat například používání pojmů vyjadřujících regionální členění, koncentraci, pásmovitost, gradient, jádro, periferii, kontinuitu, diskontinuitu nebo směr změny. Zároveň by bylo možné rozlišit, zda participant pracoval s informacemi přímo dostupnými v mapě, nebo do odpovědi vnášel objekty a jevy, které v mapě nebyly zobrazeny, ale vycházely z jeho předchozích geografických znalostí. Právě tato rovina by mohla být důležitá pro rozlišení mezi *map reading*, *map interpretation* a obecnou geografickou inferencí.

Z metodologického hlediska se jako zvlášť hodnotné jeví **propojení výpovědí participantů s jejich očními pohyby**. Samotná fixace neříká, jak participant sledovaný objekt významově interpretoval, zatímco samotná výpověď neukazuje, zda se opírala o konkrétní mapový obsah. Kombinace obou zdrojů by umožnila sledovat, zda participant nejprve fixoval legendu a poté použil odpovídající terminologii, zda při popisu konkrétní oblasti skutečně sledoval daný region v mapě, nebo zda docházelo k nesouladu mezi verbální odpovědí a vizuální pozorností. V případě interaktivního atlasu by bylo možné do této kombinace zahrnout také interakční data, například změny měřítka, *hover* nad legendou, otevření *pop-up* okna nebo přepnutí tematické vrstvy. Vznikla by tak trojice navzájem propojitelných datových zdrojů: kam se participant díval, co s mapou dělal a co o ní říkal.

V této disertační práci však byly tyto možnosti ponechány především jako **perspektiva dalšího výzkumu**. Důvodem nebyla nízká relevance lingvistických dat, ale spíše rozsah

a zaměření samotné disertační práce, která se soustředí na metodologii analýzy eye-tracking dat u IKV. Plnohodnotná lingvistická analýza by vyžadovala samostatný analytický rámec, důsledné čištění a segmentaci transkriptů, kontrolu rolí mluvčích, odstranění instrukcí operátora, sjednocení terminologie, případně anotaci geografických pojmů, prostorových vztahů a interpretačních výroků. Z tohoto důvodu byla lingvistická část v rámci PS3 využita pouze okrajově a nebyla dále rozpracována do úrovně hlavních výsledků.

Přesto je nutné zdůraznit, že vytvořený soubor transkribovaných výpovědí představuje **významný výzkumný potenciál**. V kombinaci s eye-tracking záznamy, interakčními logy, časovými charakteristikami úloh a údaji o použitých mapách vznikla datově bohatá sada, která umožňuje do budoucna zkoumat nejen použitelnost atlasového prostředí, ale také samotný proces extrakce geografické informace z mapy. Lingvistická analýza by mohla přispět k pochopení toho, jak uživatelé převádějí vizuální kartografickou informaci do slovního popisu, jak rozlišují mezi popisem a interpretací, jaké mentální struktury využívají při čtení mapy a jak se jejich verbální strategie liší mezi statickým a interaktivním atlasem. V rámci této případové studie proto byla lingvistická data chápána především jako doplňková a perspektivní vrstva, která rozšiřuje možnosti budoucího mezioborového zpracování na pomezí kartografie, kognitivní lingvistiky, psychologie, human-computer interaction a eye-tracking analýzy.

7.3.5 Hlavní zjištění (PS3)

Případová studie PS3 přinesla **především metodologická zjištění** týkající se zpracování eye-tracking dat při práci se statickým a interaktivním atlasovým produktem. Její hlavní přínos nespočíval v systematickém hodnocení použitelnosti statického a interaktivního atlasu, ale v ověření toho, jak lze vůbec data vznikající nad těmito typy kartografických stimulů převést do analyzovatelné podoby. V tomto smyslu šlo o studii metodologickou, nikoliv primárně evaluační. Přesto poskytla řadu dílčích poznatků o tom, jak participanti s atlasovými produkty pracovali, jaké mapy volili, jaké problémy se při řešení úloh objevovaly a jaké analytické strategie se ukázaly jako použitelné pro další případové studie. Oproti předchozím případovým studiím zde byl řešen výrazně komplexnější typ kartografického stimulu, protože atlas nefungoval pouze jako izolovaná mapa, ale jako širší mapové prostředí, v němž uživatel musel vyhledat vhodnou mapu, orientovat se v tematickém obsahu, pracovat s legendou a v případě interaktivní varianty navíc manipulovat s měřítkem, mapovým výřezem a prvky uživatelského rozhraní.

Analýza statického atlasu ukázala, že ani práce s tištěným kartografickým produktem není z hlediska eye-tracking přístupu metodologicky jednoduchá, pokud je experiment realizován v real-world režimu pomocí mobilních eye-tracking brýlí. Přestože mapový obsah zůstával stabilní, záznam pohledu byl vázán na videoscénu, nikoliv na pevnou souřadnicovou soustavu dvojstrany s mapami. Bylo proto nutné převést fixace do statických snímků stran atlasu prostřednictvím **asistovaného mapování** v Tobii Pro Lab. Tento postup se ukázal jako použitelný, avšak nikoliv plně automatický. Úspěšnost přiřazení fixací závisela na kvalitě referenčního snímku, jeho barevnosti, kontrastu, podobnosti vůči záznamu scény a úplnosti zachycení dvojstrany atlasu v zorném poli kamery. Nejsložitější byly méně kontrastní mapy s převahou homogenních ploch nebo liniových prvků, zejména mapy s velkým podílem oceánské plochy. V těchto případech bylo nutné fixace častěji manuálně korigovat nebo doplňovat. Významným výsledkem však bylo, že všechny relevantní fixace ze statické části byly

nakonec úspěšně přiřazeny k odpovídajícím snapshotům, což tedy ověřilo praktickou využitelnost asistovaného mapování pro analýzu tištěného atlasu.

Z hlediska **evidence použitých map** participantem zároveň vyplynulo, že u statického atlasu participanté ve většině případů volili očekávané mapové listy. V analyzované sadě statické části bylo pro každou úlohu evidováno 41 záznamů. U úloh zaměřené na výškové uspořádání Evropy byla nejčastěji použita *Fyzická mapa Evropy* na stranách 48–49, a to ve 37 případech. U vegetačních pásem Afriky byla nejčastěji použita mapa *Šířková vegetační pásma Afriky* na straně 101 ve 33 případech, zatímco osm participantů využilo širší mapu *Šířková vegetační pásma světa* na stranách 20–21. U hustoty zalidnění Severní Ameriky dominovala mapa *Hustota zalidnění Severní Ameriky* na straně 118, použitá ve 37 případech. U těžby zlata v Asii byla nejčastěji použita mapa *Hospodářství* na stranách 86–87, rovněž ve 37 případech, přičemž část participantů sáhla po mapě *Surovinové zdroje světa* na stranách 34–35. U zemětřesení byla nejstabilněji používána *Geologická mapa* na stranách 14–15, zaznamenaná ve 40 případech. U spotřeby kalorií převažovala mapa *Výživa obyvatelstva* na stranách 42–43 ve 38 případech. U námořních tras se nejčastěji objevovala mapa *Doprava* na stranách 38–39, zatímco u objevných cest mapa *Objevné cesty* na stranách 30–31, která byla použita ve všech 41 případech dané úlohy. Tyto výsledky ukázaly, že u tištěného atlasu byla vazba mezi zadáním úlohy a volbou mapy relativně stabilní, avšak i zde se objevovaly odchylky, alternativní mapy a vliv předchozí úlohy, například při návaznosti témat dopravy a objevných cest.

U interaktivního atlasu byla situace složitější, protože participanté často nepracovali pouze s jedním mapovým stavem, ale v průběhu řešení přecházeli mezi tematickými mapami, měnili měřítko, používali *pop-up* okna, legendu a postranní panel. U výškového uspořádání Evropy dominovala mapa *Povrch Země*, použitá ve 42 případech při započtení všech použitých map. U vegetačních pásem byla nejčastěji využívána mapa *Šířková vegetační pásma*, a to ve 39 případech. U hustoty zalidnění Severní Ameriky se ukázalo, že participanté častěji kombinovali více variant populačních map; při sloučení map *Zalidnění oblastí 1 a 2* bylo zaznamenáno celkem 51 použití, které dokládají časté přecházení mezi souvisejícími tematickými vrstvami. U těžby zlata byla nejčastěji použita mapa *Těžba – podíl na HDP*, zaznamenaná 46krát. U zemětřesení byla volba map nejméně jednoznačná, neb nejčastěji se objevila mapa *Desková tektonika a vulkanismus* ve 28 případech, dále *Přírodní rizika* ve 21 případech a různé varianty mapy *Litosférické desky* ve 15 případech. Nejdůležitější však byla vždy časově dominantnější mapa, zpravidla použitá až jako poslední pro průzkumu předchozích, méně relevantních map. U spotřeby kalorií byla nejstabilnější mapa *Spotřeba kalorií*, evidovaná ve 43 případech. U námořních tras dominovala mapa *Doprava* ve 42 případech a u objevných cest mapa *Objevné cesty* ve 43 případech. Z těchto výsledků vyplynulo, že některé úlohy vedly k poměrně jednoznačné volbě tematické mapy, zatímco jiné, zejména hustota zalidnění a zemětřesení, vyvolávaly větší variabilitu ve volbě zdrojového mapového obsahu.

Záznamy dále ukázaly několik **praktických problémů interaktivního atlasu**, které byly důležité pro interpretaci dat. U části participantů byla matoucí ikona vrstev, protože místo vyhledávání konkrétní mapy klikali na pole „Povrch Země“. Při vyhledávání se objevoval prvek „Hledáte mapu?“, který po dopsání dotazu mizel, což mohlo ovlivňovat strategii vyhledávání. U úlohy zaměřené na těžbu zlata byl opakovaně zaznamenan problém se zobrazením surovin a nutností pracovat s legendou nebo postranním panelem. Právě tato úloha často vedla

k interakcím typu *scrollování sidebaru*, kliknutí na položku *zlato* nebo využívání *pop-up* oken. U vegetačních pásem Afriky bylo naopak typické časté využívání *pop-up* oken a interakcí s legendou, zatímco u námořních tras a objevných cest se častěji objevovalo procházení legendy, zapínání a vypínání tematických kategorií nebo práce s jednotlivými liniovými jevy. Tyto poznatky nebyly systematickým hodnocením použitelnosti atlasu, ale poskytly důležitý kontext pro pochopení toho, proč bylo zpracování eye-tracking dat nad interaktivním atlasem výrazně náročnější než u statické varianty.

Nejdůležitějším metodologickým výstupem PS3 bylo **ověření tří přístupů ke zpracování eye-tracking dat** z interaktivního atlasu. První přístup využíval **(I) asistované mapování** do statického snímku u relativně jednoduché úlohy T1 zaměřené na výškové uspořádání Evropy. Tento přístup se ukázal jako nejvhodnější v situacích, kdy se mapový obsah v průběhu řešení **měnil jen omezeně** a participant pracoval převážně se **stabilním** mapovým výřezem. Výsledkem bylo přiřazení fixací do statického obrázku mapy a částečně také do postranního panelu. Limit tohoto přístupu spočíval v tom, že neřešil krátkodobé interaktivní stavy, například *hover* efekty, *pop-up* okna nebo změny obsahu vyvolané interakcí. Přesto šlo o nejefektivnější variantu z hlediska poměru mezi vloženou prací a získaným analytickým výstupem.

Druhý přístup byl použit u úlohy T2 zaměřené na šířková vegetační pásma Afriky a kombinoval **(II) asistované mapování s manuálním zaznamenáváním interaktivity** prostřednictvím *custom events* v Tobii Pro Lab. Jeho cílem bylo zachytit nejen polohu fixací, ale také výskyt *pop-up* oken, *hover* akcí v mapě a legendě a kliknutí do legendy. Tento přístup tak byl metodologicky nejbohatší, protože umožnil popsat i ty interakční stavy, které nebyly zachyceny samotným CartoLogger nástrojem nebo změnou URL adresy. Současně se však ukázal jako **časově nejnáročnější**, protože bylo nutné záznam procházet ručně, opravovat nebo doplňovat fixace a současně vytvářet události zachycující proměnlivý stav mapového rozhraní. Právě tento přístup ukázal, že zachycení interaktivity u webových map vyžaduje kombinaci více datových vrstev a nelze jej spolehlivě nahradit pouze automatickým mapováním fixací.

Třetí přístup využíval **(III) schematické mapování** a byl testován u úlohy T4 zaměřené na těžbu zlata v Asii. V tomto případě byl vytvořen **analytický referenční obraz**, který neodpovídal jednomu konkrétnímu okamžiku záznamu, ale integroval mapové pole, rozbalený sidebar, legendu a další prvky rozhraní. Tento přístup byl vhodný pro komplexnější úlohy, v nichž se měnilo měřítko, stav legendy i obsah mapového pole. Asistované mapování zde mohlo pomoci pouze částečně, protože v některých okamžicích se stav videozáznamu podobal vytvořenému schématu, avšak podstatná část práce spočívala v **ručním přiřazování fixací**. Přínos tohoto přístupu byl v tom, že umožnil zachytit vztah mezi pohledem na mapové pole, legendu a postranní panel i v situaci, kdy dynamický stimul nebylo možné převést do jednoho přesného screenshotu.

Porovnání těchto tří přístupů pomocí **indexu normalizované náročnosti mapování** ukázalo, že **nejefektivnější byl první přístup** použitý u úlohy T1. Při typické zátěži, definované mediánovou délkou úlohy 89,225 s a mediánovým počtem 261 fixací, odpovídala upravená délka mapování 8,89 min a hodnota INNM činila 0,854. Druhý nejlepší výsledek vykázal třetí, schematický přístup u úlohy T4, u něhož byla upravená délka mapování 10,90 min a INNM 1,047. Nejméně efektivní byl druhý přístup u úlohy T2, kde upravená délka mapování dosáhla

12,06 min a INNM 1,123. Tento výsledek potvrzuje, že nejvyšší časovou náročnost nevyvolává pouze délka záznamu, ale zejména nutnost zachytit a interpretovat interaktivní stavy, které se v dynamickém mapovém prostředí objevují krátkodobě a často nejsou dostatečně reprezentovány běžnými výstupy eye-tracking softwaru.

Dodatečná korelační analýza potvrdila, že délka mapování fixací byla silně navázána na rozsah zpracovávaného záznamu. Ve všech analyzovaných úlohách silně korelovala s délkou řešení úlohy i s počtem fixací. To znamená, že pracnost mapování nelze interpretovat izolovaně pouze jako vlastnost konkrétního analytického přístupu, protože delší úlohy a záznamy s vyšším počtem fixací přirozeně vyžadovaly delší kontrolu, korekce a doplňování. Zároveň se ukázalo, že počet zoomů a celkový počet interakcí byly velmi úzce propojeny, a proto je nelze v případných vícerozměrných modelech nekriticky chápat jako zcela nezávislé prediktory. Tento výsledek zdůraznil potřebu normalizovaných nebo relativizovaných metrik a podpořil využití INNM jako vhodnějšího ukazatele pro porovnávání pracnosti jednotlivých přístupů.

Významným výstupem PS3 bylo rovněž ověření nutnosti kombinovat eye-tracking data s dalšími zdroji informací. U interaktivního atlasu se jako zásadní ukázalo **logování interakcí** prostřednictvím nástroje CartoLogger, který zaznamenával změny URL, kliknutí, posuny mapy a změny měřítka. Tyto záznamy umožnily rekonstruovat stav mapového prostředí, tedy zejména tematickou mapu, úroveň přiblížení a aktuální výřez. Následné **rozšíření nástroje MapLogger** umožnilo tato data importovat, agregovat, vizualizovat a propojit s ručně vytvořenými *custom events* z Tobii Pro Lab. Výsledkem byl komplexnější datový balíček, který spojoval informaci o tom, kam se participant díval, co s mapou dělal a v jakém stavu se mapové prostředí nacházelo.

Případová studie zároveň vytvořila rozsáhlou datovou základnu, která však nemohla být v rámci této disertační práce vytěžena v plném rozsahu. Vedle eye-tracking záznamů vznikla také data o použitých mapách, časovém průběhu úloh, interakcích s atlasem, změnách URL, *custom events*, zvukové záznamy a transkribované výpovědi participantů z metody talk-aloud. Tato baterie dat umožňuje do budoucna provést detailnější porovnání práce se statickým a interaktivním atlasem, systematické hodnocení použitelnosti obou variant, lingvistickou analýzu odpovědí participantů, analýzu strategií práce s atlasem i hlubší propojení pohledu, interakcí a verbálního projevu.

Hlavní zjištění PS3 lze proto shrnout tak, že studie **prokázala praktickou proveditelnost**, ale zároveň **vysokou náročnost analýzy eye-tracking dat** nad atlasovými produkty. U statického atlasu bylo možné využít asistované mapování fixací do snapshotů, avšak s nutností následné kontroly a manuální korekce. U interaktivního atlasu nebylo možné spoléhat na jediný univerzální postup a bylo nutné navrhnout více alternativních přístupů podle charakteru úlohy, míry interaktivity a stability mapového obsahu. Tím PS3 poskytla důležité metodologické poznatky pro navazující případové studie a současně ukázala, že analýza IKV musí být založena na kombinaci eye-tracking dat, záznamu interakcí, znalosti aktuálního stavu mapového prostředí a případně také verbálních dat. Přestože tedy studie systematicky nehodnotila použitelnost obou atlasů, přinesla podstatné poznatky o tom, jak takové hodnocení v budoucnu metodologicky uchopit.

Veškerá podkladová data pro PS3 jsou k dispozici v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP a dále na datovém úložišti disertační práce (viz kapitola Přílohy).

PS4

7.4 Uživatelské interakce na stolním a mobilním zařízení (PS4)

Hodnocený produkt	vlastní webová aplikace MishPink s IKV
Základní metody	eye-tracking (AOI, kvalitativní inspekce záznamů), logování interakcí
Použité zařízení	GazePoint GP3-HD (stolní počítač), GP3-Mobile (mobilní telefon)
Hlavní nástroje	GazePoint Analysis Professional (v7.0.0), MishPink (log. interakcí)
Počet úloh	9 (+ 1× trénovací)
Počet participantů	41

Případová studie PS4 byla zaměřena na **uživatelské interakce** s IKV na **stolním počítači** a **mobilním zařízení**. Na rozdíl od předchozích případových studií nebylo hlavním cílem primárně hodnotit použitelnost konkrétního kartografického produktu, ale využít experiment jako metodologickou sondu do možností kombinace interakčního logování a eye-tracking dat při výzkumu práce uživatelů s interaktivními mapami. Logované interakce se v předchozích případových studiích ukázaly jako velmi slibný zdroj dat, protože umožňovaly zachytit konkrétní průběh řešení úloh, práci s mapovým rozhraním, změny měřítka, posuny mapy, přepínání vrstev nebo i otevírání informačních oken. Tato studie proto dále rozvíjela tuto linii výzkumu a sledovala, jak se uživatelské strategie lišily mezi počítačovým a mobilním prostředím, a to nikoliv pouze podle výsledné správnosti odpovědí, ale především podle struktury, četnosti a povahy prováděných interakcí.

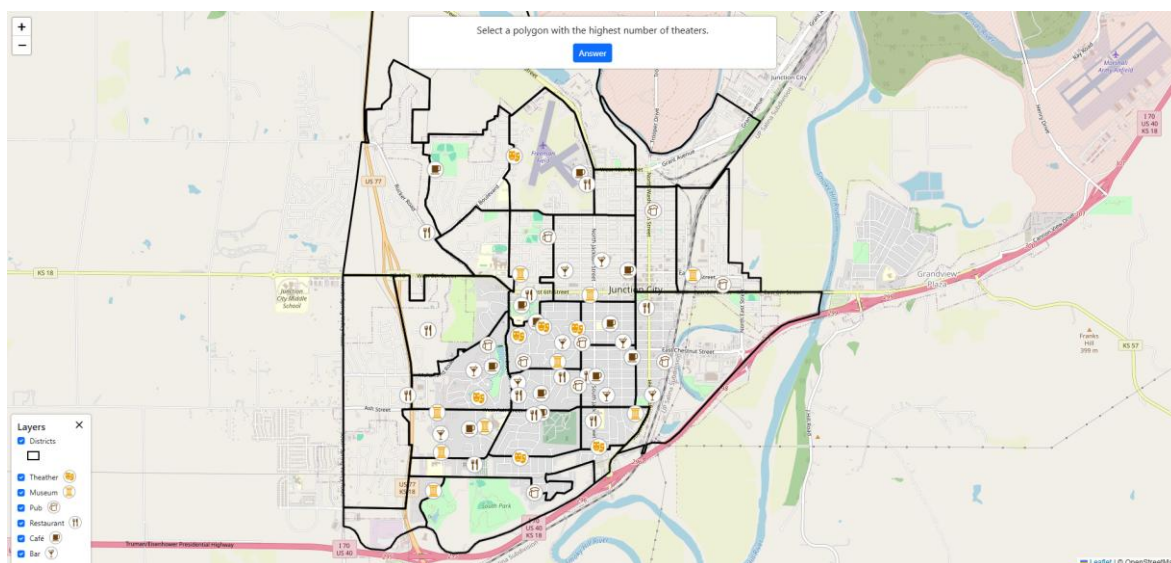
Experiment byl realizován v rámci širšího autorského kolektivu ve složení Stanislav Popelka, Ondřej Růžička, Tomáš Vaníček, Kamila Fačevicová, Markéta Beitlová, Michaela Vojtěchovská, Paweł Cybulski a Zdeněk Stachoň. Autor disertační práce se na této studii podílel zejména **zpracováním a interpretací vzniklých eye-tracking dat**, a to především v prostředí GazePoint Analysis Professional, kvalitativní inspekci záznamů a hledáním vztahů mezi vizuální pozorností uživatelů a jejich zaznamenanými interakcemi. Vzhledem k technickým a softwarovým omezením nebyla eye-tracking data využita jako izolovaný kvantitativní zdroj pro detailní AOI analýzu, ale především jako interpretační vrstva doplňující logované interakce. Tím studie poskytla důležitý metodologický přínos pro základní výzkum v oblasti hodnocení IKV, neboť ukázala, jak lze kombinovat explicitně zaznamenané uživatelské akce s kvalitativní analýzou vizuální pozornosti při řešení totožných mapových úloh na různých typech zařízení.

★ **[Q1]** Tato PS4 byla **odeslána** k publikaci (k 30. 03. 2026) v rámci článku: Popelka, S., Růžička, O., **Vaníček, T.**, Fačevicová, K., Stachoň, Z., Beitlová, M., Vojtěchovská, M., Cybulski, P. (2026). Evaluating User Interaction with Cartographic Visualizations on Mobile and Desktop Platforms. International Journal of Human-Computer Interaction.

7.4.1 Hodnocený produkt (PS4)

Hodnoceným produktem v případové studii PS4 byla **experimentální webová mapová aplikace s IKV** vytvořená autorským kolektivem. Aplikace byla sestavena jako **kontrolované prostředí** pro sledování práce uživatelů na stolním počítači a mobilním telefonu. Nešlo tedy primárně o klasické testování použitelnosti jednoho konkrétního výsledného produktu ve smyslu hledání jeho návrhových nedostatků, ale spíše o využití této aplikace jako výzkumného stimulu. Cílem bylo zjistit, jak participant s IKV pracovali, jaké **interakční strategie** volili, jak se tyto strategie lišily mezi počítačovým a mobilním prostředím a jak bylo možné zaznamenané interakce následně **kombinovat s eye-tracking daty**. Aplikace proto plnila především funkci standardizovaného experimentálního rozhraní, v němž bylo možné porovnávat totožné nebo srovnatelné mapové úlohy napříč dvěma typy zařízení.

Experimentální aplikace byla navržena jako **responzivní webové prostředí**, aby byla plně použitelná jak na stolním počítači, tak na mobilním zařízení. Mapová část byla implementována v prostředí Leaflet nad podkladovou mapou OpenStreetMap. V aplikaci byly použity vrstvy ve formátu GeoJSON, a to jak pro **plošné areálové jednotky** využívané v kartogramech, tak i pro **bodové prvky zájmu** (POI) zobrazované pomocí vlastních SVG ikon (**Obrázek 80**). Vrstvy zobrazené kartogramem byly vyjádřeny výplní na základě kvantitativních hodnot atributů. Bodové vrstvy pak bylo možné filtrovat podle tematických kategorií jako kvalitativní informaci. Z hlediska použitých kartografických metod tak experimentální stimuly zahrnovaly především kartogramy a mapy bodových znaků, které reprezentovaly dva odlišné typy IKV a současně vyžadovaly odlišné způsoby práce s mapovým rozhraním.



Obrázek 80: Ukázka experimentálního prostředí PS4 na příkladu úlohy s bodovými prvky zájmu v interaktivní mapové aplikaci.

Úlohy s kartogramy byly založeny na datech za okresy ve středozápadní části Spojených států amerických a zobrazovaly různé tematické jevy. Barevné stupnice byly zvoleny pomocí nástroje ColorBrewer s ohledem na dostatečnou vizuální diferenciaci a čitelnost. Interaktivita byla u těchto úloh podstatnou součástí řešení, protože participant museli pracovat s výběrem vrstev, klikáním na polygonové prvky a otevíráním pop-up oken s konkrétními atributovými

hodnotami. Některé úlohy s kartogramy pracovaly s jednou tematickou vrstvou, jiné kombinovaly více tematických vrstev nebo umožňovaly porovnání dvou jevů či jednoho jevu v různých časových obdobích. V těchto případech bylo nutné vrstvy aktivně zapínat a vypínat, aby bylo možné izolovat relevantní informaci a dokončit úlohu. Tím byly tyto stimuly vhodné nejen pro sledování výsledné správnosti odpovědí, ale zejména pro analýzu procesu řešení, tedy způsobu, jakým uživatelé vyhledávali hodnoty, porovnávali územní jednotky a využívali dostupné interaktivní prvky.

Druhý typ stimulů tvořily **mapy bodových znaků** zaměřené na území Junction City v Missouri. Tyto mapy zobrazovaly body zájmu, například divadla, muzea, hospody, restaurace, kavárny nebo bary, a současně obsahovaly polygonovou vrstvu městských částí. U bodových map nebyla interaktivita vždy nezbytnou podmínkou pro nalezení odpovědi, avšak její využití mohlo výrazně usnadnit řešení úloh. Zejména přepínání viditelnosti tematických vrstev umožňovalo omezit vizuální zahlcení mapy a soustředit se pouze na relevantní kategorie bodových znaků. Tyto stimuly proto umožnily sledovat, zda a jak účastníci využívali interaktivní funkce i v situacích, kdy nebyly zcela povinné, ale mohly zefektivnit orientaci v mapě a snížit nároky na vizuální vyhledávání.

Zásadní součástí hodnoceného produktu byl nástroj **MishPink**, který byl vyvinut jako vlastní responzivní webová aplikace odpovídající metodologickým požadavkům experimentu. Jeho využití vycházelo z potřeby zaznamenávat jemnozrná a úlohově vázaná a mapově specifická interakční data, což běžné dostupné nástroje pro logování uživatelských akcí neumožňovaly v dostatečné míře nebo nebyly vhodné pro kontrolovaný experiment s vlastními kartografickými stimuly. MishPink podporoval celý experimentální průběh od úvodního sběru demografických údajů až po řešení jednotlivých mapových úloh a současně zajišťoval detailní logování práce účastníků s aplikací.

MishPink zaznamenával **technické i behaviorální informace** o průběhu experimentu. Do logů se ukládal typ zařízení, operační systém a jeho verze, rozlišení obrazovky, velikost viewportu, použitý prohlížeč a jeho verze, orientace obrazovky, jedinečné ID uživatele, časové značky a konkrétní akce provedené během řešení úloh. Mezi zaznamenávané interakce patřilo přibližování a oddalování mapy, posun mapového pole, zapínání a vypínání vrstev, otevírání a zavírání pop-up oken nebo klikání na mapové prvky za účelem zobrazení atributových informací. Vedle těchto mapových interakcí aplikace ukládala také tzv. milníkové události experimentálního průběhu, například inicializaci úlohy, otevření či zavření dialogového okna, výběr odpovědi, výběr polygonu nebo dokončení úlohy. Každou interakci tak bylo možné přiřadit ke konkrétní fázi řešení a konkrétní úloze.

Technicky byl MishPink založen na oddělení klientské a serverové části. Klientská část fungovala jako samostatná JavaScript knihovna, kterou bylo možné připojit k instanci mapy v prostředí Leaflet a automaticky tak zaznamenávat standardní kartografické interakce, například ukončení změny měřítka, začátek a konec posunu mapy, změnu podkladové či tematické vrstvy nebo práci s pop-up okny. Pro zvýšení spolehlivosti bylo využito lokální ukládání událostí v prohlížeči prostřednictvím IndexedDB, takže interakce nebyly ztraceny ani při dočasných problémech s připojením. Serverová část byla implementována v prostředí Laravel v jazyce PHP a zajišťovala validaci, příjem a dlouhodobé ukládání odesílaných logů prostřednictvím REST API. Tato architektura umožnila oddělit samotné zachytávání interakcí

od jejich následného ukládání a vytvořila stabilní základ pro podrobnou analýzu uživatelského chování.

Výsledkem byl experimentální produkt, který nebyl hodnocen jako izolovaná mapová aplikace určená pro běžný provoz, ale jako řízené výzkumné prostředí pro studium interakce s kartografickými vizualizacemi. Jeho hlavní hodnota spočívala v tom, že umožnil propojit standardizované mapové stimuly, responzivní zobrazení na různých typech zařízení, detailní logování uživatelských akcí a paralelní záznam metodou eye-tracking. Tím se aplikace stala vhodným podkladem pro metodologicky orientovanou případovou studii, jejímž cílem bylo lépe porozumět tomu, jak uživatelé pracovali s interaktivními mapami na stolním počítači a na mobilním telefonu, nikoliv pouze tomu, zda dokázali správně odpovědět na zadané úlohy.

7.4.2 Zadání úloh a průběh experimentu (PS4)

Zadání úloh v PS4 bylo navrženo tak, aby umožnilo porovnat práci participantů s IKV na stolním počítači a mobilním telefonu za kontrolovaných, ale vzájemně srovnatelných podmínek. Experimentální baterie obsahovala **jednu trénovací úlohu a devět hlavních úloh**, které byly připraveny **ve dvou variantách**. Varianta 1 a varianta 2 měly odlišné konkrétní zadání, avšak zachovávaly obdobný typ úlohy, způsob kartografického vyjádření i předpokládané interakční nároky. Tento postup byl zvolen proto, že každý participant pracoval s oběma typy zařízení, a bylo proto nutné omezit efekt učení a zapamatování konkrétních odpovědí. Přehled obou variant úloh, včetně jejich identifikátoru, typu, zadání, způsobu vyjádření a časového limitu, uvádí **Tabulka 12**.

Tabulka 12: Přehled úloh PS4 pro participanty ve dvou variantách

ID úlohy	Typ úlohy	Zadání úlohy	Způsob vyjádření	Časový limit
Varianta 1				
Tr	Vyhledávací	Zobrazte vrstvu okresu, poté si přiblížte NEJZÁPADNĚJŠÍ okres České republiky a kliknutím myši zjistěte jeho název. Klikněte na ODPOVĚĎ a vyberte správnou možnost.	Kartogram	Bez limitu
01A-v1	Vyhledávací	Vyberte polygon s nejvyšší hustotou obyvatelstva .	Kartogram	Bez limitu
02A-v1	Analytická	Vyberte polygon s nejvyšším počtem divadel .	Bodové znaky	Bez limitu
01B-v1	Vyhledávací	Vyberte polygon s hustotou zalidnění vyšší než 1 500 a počtem domácností vyšším než 300 000 .	Kartogram	Bez limitu
02B-v1	Analytická	Vyberte polygon s nejvyšším počtem restaurací .	Bodové znaky	Bez limitu
03A-v1	Srovnávací	Mezi kterými dvěma polygony dochází k největší změně znečištění prachem ? Vyberte jeden z nich.	Kartogram	Bez limitu
01C-v1	Vyhledávací	Zjistěte, kolik kaváren je na mapě.	Bodové znaky	Bez limitu
03B-v1	Srovnávací	Vyberte polygon s největším nárůstem počtu zaměstnanců v cestovním ruchu na 100 000 obyvatel v letech 2010–2020.	Kartogram	Bez limitu
04A-v1	Srovnávací	Je v této oblasti více barů než restaurací ?	Bodové znaky	Bez limitu
05A-v1	Plánovací	Vyberte polygon, kde je potřeba nový program podpory zaměstnanosti , na základě nejvyšší míry kriminality a úrovně znečištění ovzduší.	Kartogram	Bez limitu

Varianta 2				
Tr	Vyhledávací	Zobrazte vrstvu okresu, poté si přiblížte NEJVÝCHODNĚJŠÍ okres České republiky a kliknutím myši zjistěte jeho název. Klikněte na ODPOVĚĎ a vyberte správnou možnost.	Kartogram	Bez limitu
01A-v2	Vyhledávací	Vyberte polygon s nejnižší hustotou obyvatelstva .	Kartogram	Bez limitu
02A-v2	Analytická	Vyberte polygon s nejvyšším počtem muzeí .	Bodové znaky	Bez limitu
01B-v2	Vyhledávací	Vyberte polygon s hustotou menší než 5 a počtem domácností menším než 1300 .	Kartogram	Bez limitu
02B-v2	Analytická	Vyberte polygon s nejvyšším počtem kaváren .	Bodové znaky	Bez limitu
03A-v2	Srovnávací	Vyberte polygon, na jehož hranici dochází k největší změně znečištění oxidy síry .	Kartogram	Bez limitu
01C-v2	Vyhledávací	Zjistěte, kolik restaurací je na mapě.	Bodové znaky	Bez limitu
03B-v2	Srovnávací	Vyberte polygon s nejnižší změnou počtu zaměstnanců v cestovním ruchu na 100 000 obyvatel v letech 2010–2020.	Kartogram	Bez limitu
04A-v2	Srovnávací	Je v této oblasti více hospod než kaváren ?	Bodové znaky	Bez limitu
05A-v2	Plánovací	Vyberte polygon, kde není potřeba nový program na podporu zaměstnanosti , na základě nejnižší míry kriminality a úrovně znečištění ovzduší.	Kartogram	Bez limitu

V experimentu byly zastoupeny zejména úlohy **vyhledávací, analytické, srovnávací a plánovací**. Vyhledávací úlohy byly zaměřeny na nalezení konkrétního polygonu nebo zjištění konkrétní hodnoty v mapě, například polygonu s nejvyšší či nejnižší hustotou obyvatelstva nebo počtu vybraných bodových prvků v mapě. Analytické úlohy pracovaly především s mapami bodových znaků a vyžadovaly posouzení četnosti a rozmístění prvků zájmu v polygonových jednotkách, například při výběru polygonu s nejvyšším počtem divadel, muzeí, restaurací nebo kaváren. Srovnávací úlohy vyžadovaly porovnání prostorových jednotek, kategorií nebo časových změn, například při identifikaci největší změny znečištění mezi polygony nebo při porovnání počtu vybraných typů bodových prvků. Plánovací úloha pak představovala komplexnější rozhodovací situaci, v níž měl participant vybrat polygon na základě kombinace více tematických kritérií, konkrétně míry kriminality a úrovně znečištění ovzduší.

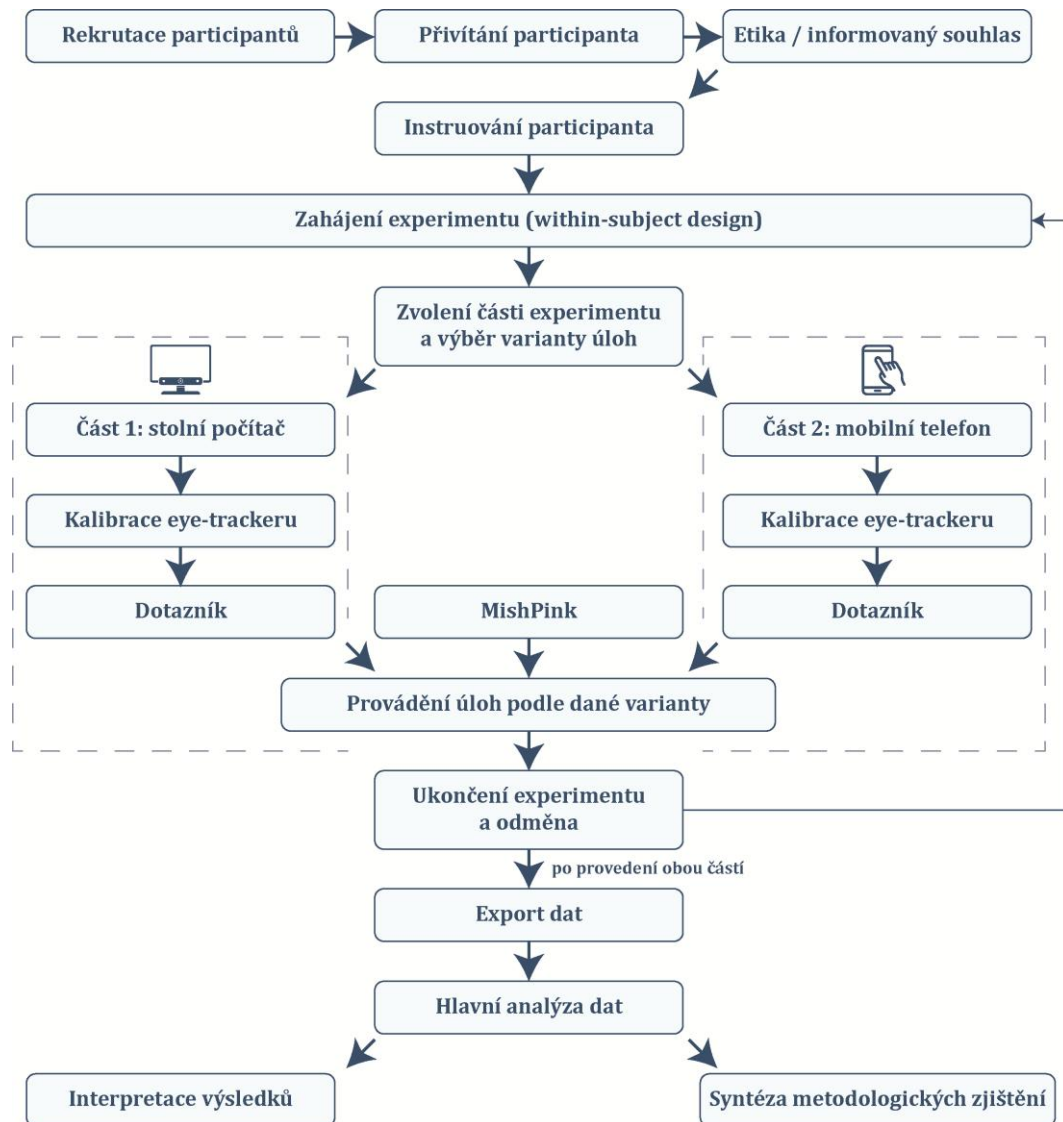
Z hlediska kartografického vyjádření byly v experimentu použity dva základní typy stimulů: kartogramy a mapy s bodovými znaky. Kartogramy byly využity zejména u úloh zaměřených na vyhledávání, srovnání a rozhodování na základě atributových hodnot polygonových jednotek. Mapy bodových znaků byly použity u úloh, v nichž participant pracovali s body zájmu a jejich četností v jednotlivých územních jednotkách. Zadání úloh bylo zobrazováno přímo v horní části mapového rozhraní a odpověď byla odesílána prostřednictvím příslušného ovládacího prvku v aplikaci. Všechny úlohy byly bez časového limitu, aby bylo možné sledovat přirozenější průběh řešení, rozdíly v interakčních strategiích a odlišnosti mezi zařízeními bez dodatečného tlaku způsobeného omezeným časem.

Trénovací úloha sloužila k seznámení participantů s mapovým rozhraním a základními interakcemi. Participant měl zobrazit vrstvu okresů, přiblížit nejzápadnější nebo nejvýchodnější okres České republiky podle zvolené varianty, kliknutím na mapový objekt

zjistit jeho název a následně vybrat správnou odpověď. Tato úloha ověřovala, že participant porozuměl základní práci s aplikací, zejména ovládání vrstev, posunu a přiblížení mapy, výběru prvků a odeslání odpovědi. Teprve poté následovalo řešení hlavních úloh. Pořadí úloh bylo navrženo tak, aby se postupně zvyšovala jejich interpretační a interakční náročnost, přičemž se střídaly kartogramy a mapy bodových znaků. Tím bylo omezeno jednostranné navyknutí na jeden typ vizualizace a současně bylo možné sledovat rozdíly v práci s různými formami interaktivního kartografického vyjádření.

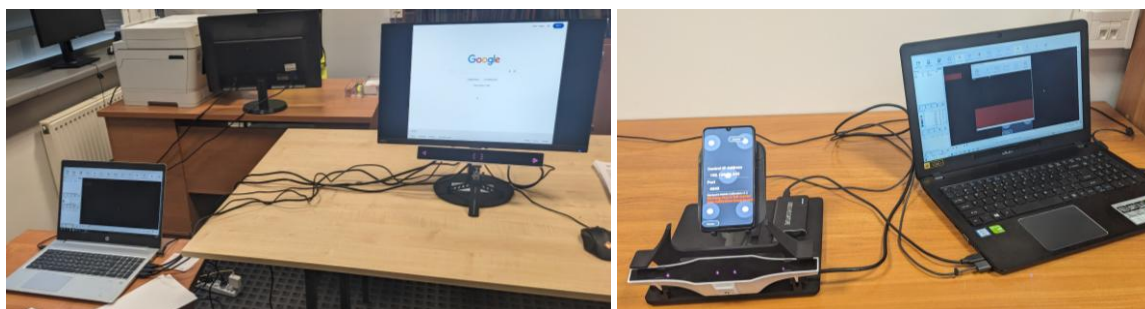
Experiment byl realizován jako *within-subject design*, protože každý participant absolvoval testování na obou typech zařízení. Tento návrh umožnil sledovat rozdíly mezi počítačovým a mobilním prostředím na úrovni téhož uživatele, nikoliv pouze mezi dvěma nezávislými skupinami participantů. Aby nedošlo ke zkreslení výsledků pořadím zařízení, byla experimentální sekvence vyvažována. Participant tedy začínal buď na stolním počítači s jednou variantou úloh, nebo na mobilním telefonu s druhou variantou, a po dokončení první části přešel na druhé zařízení, kde řešil druhou variantu úloh. Díky tomu bylo možné porovnávat chování uživatelů mezi zařízeními a současně omezit vliv opakovaného řešení totožného zadání.

Průběh experimentu začínal rekrutací participantů, jejich přivítáním a vysvětlením základního účelu testování. Participantům bylo sděleno, že cílem nebylo hodnotit jejich osobní výkon, ale způsob práce s interaktivními mapami a rozdíly v používání mapového rozhraní. Následovala část věnovaná etice výzkumu a informovanému souhlasu. Po podepsání souhlasu byli participant instruíováni k průběhu experimentu a byl zahájen vlastní experimentální protokol. V jeho rámci byla zvolena příslušná část experimentu a varianta úloh, podle níž participant pokračoval buď do počítačové nebo mobilní části testování. Celkový postup experimentu, včetně návaznosti jednotlivých fází, znázorňuje **Obrázek 81**.



Obrázek 81: Průběh experimentu PS4.

V každé části experimentu následovala nejprve kalibrace eye-trackeru pro dané zařízení. Kalibrace byla devítibodová u PC části a pětibodová u mobilní části. U části s počítačem byla využita sestava se stolním počítačem, monitorem a stacionárním eye-trackerem **GazePoint GP3-HD** umístěného pod monitorem počítače. U druhé části s mobilním telefonem bylo využito eye-tracking systému **GP3-Mobile** speciálně uzpůsobeného pro testování pro mobilní telefony a tablety. Mobilním telefonem byl Samsung Galaxy M22. Sestavu pro obě části zobrazuje **Obrázek 82**.



Obrázek 82: Pohled na používaná zařízení pro část s počítačem (vlevo) a mobilním telefonem (vpravo).

Po kalibraci participant vyplnil **vstupní dotazník** a následně pracoval v prostředí aplikace **MishPink**, která zajišťovala jak prezentaci mapových úloh, tak podrobné zaznamenávání uživatelských interakcí. Během řešení úloh byly ukládány akce participantů, například posuny mapy, změny měřítka, práce s vrstvami, otevírání pop-up oken, výběr prvků a odeslání odpovědi. Současně byl zaznamenáván pohled uživatele pomocí eye-trackerů, aby bylo možné později interpretovat interakční chování také ve vztahu k vizuální pozornosti.

Po dokončení první části experimentu participant absolvoval druhou část na druhém typu zařízení. Teprve po provedení obou částí byl experiment ukončen a participant obdržel drobnou odměnu. Následně byla data exportována a připravena pro hlavní analýzu. Ta zahrnovala zejména vyhodnocení logovaných interakcí, úspěšnosti odpovědí, času řešení, počtu interakcí a rozdílů mezi typy zařízení. Eye-tracking data byla využita především k interpretaci výsledků a k doplnění kvantitativních zjištění o kvalitativní vzhled do průběhu řešení úloh. Celý experimentální postup tak nebyl zaměřen pouze na zjištění, zda participant odpověděl správně, ale především na pochopení toho, jakým způsobem k odpovědi dospěl a jak se tento proces lišil mezi stolním a mobilním prostředím.

7.4.3 Participantů (PS4)

Participantů PS4 byli rekrutováni v akademickém prostředí *Department of Cartography and Geomatics* na *Adam Mickiewicz University v Poznani*, kde zároveň probíhalo samotné testování. Rekrutace byla zaměřena především na studenty kartografie a geomatiky, tedy na skupinu uživatelů s různou mírou předchozí zkušenosti s mapami. Tento výběr tak umožnil sledovat způsob práce s interaktivními prvky podle úrovně kartografické expertízy. Soubor participantů tedy nebyl koncipován jako reprezentativní vzorek běžné populace, ale jako výzkumný soubor vhodný pro kontrolované porovnání interakčních strategií v prostředí IKV.

Experimentu se zúčastnilo celkem **41 participantů**, z toho 11 žen a 30 mužů. Participantů byli rozděleni **do tří skupin** podle úrovně expertízy. **Skupinu začátečníků** tvořilo 14 participantů, konkrétně studenti prvního ročníku, z toho 2 ženy; jejich průměrný věk byl 18,91 roku. **Středně pokročilou skupinu** tvořilo 18 participantů, studenti třetího ročníku, z toho 8 žen; jejich průměrný věk byl 20,95 roku. **Pokročilou skupinu** tvořilo 9 participantů, z toho 1 žena; jednalo se o studenty čtvrtého nebo pátého ročníku a jednoho zaměstnance, přičemž průměrný věk této skupiny byl 24,05 roku. Celkový průměrný věk participantů při zohlednění velikosti jednotlivých skupin činil přibližně 20,93 roku. Rozdělení do tří úrovní expertízy bylo důležité

zejména proto, že jedna z výzkumných otázek studie sledovala, zda úroveň odbornosti ovlivňovala využívání interaktivních prvků mapového rozhraní.

Před zahájením experimentu byli participantů seznámeni s účelem studie a bylo jim vysvětleno, že cílem nebylo hodnotit jejich osobní výkon, ale způsob práce s mapovým rozhraním a rozdíly mezi interakcí na stolním a mobilním zařízení. Současně byli informováni o použití eye-tracking technologie, anonymizaci získaných dat a dobrovolnosti účasti. Každý participant před zahájením testování podepsal informovaný souhlas, a to ve dvou vyhotoveních, z nichž jedno zůstalo participantovi a druhé výzkumnému týmu. Na začátku experimentu participant dále vyplnili základní demografické údaje v aplikaci, zejména své jedinečné ID, věk, obor studia a národnost. Tím bylo možné propojit jednotlivé záznamy s daty a současně zachovat anonymitu participantů.

Motivace participantů byla založena na dobrovolné účasti a drobné symbolické odměně. Po dokončení obou částí experimentu, tedy po absolvování úloh na stolním počítači i mobilním telefonu, obdrželi participant malý dárek ve formě čokolády. Tato odměna měla tedy spíše charakter poděkování za účast. Participant vstupovali do testovací místnosti ve dvojicích, přičemž jeden začínal u sestavy s počítačem a druhý u mobilního zařízení. Po dokončení první části si zařízení vyměnili, takže každý participant absolvoval experiment na obou typech zařízení. Tento postup tak umožnil získat párová data pro porovnání obou částí u téhož uživatele a současně lépe kontrolovat individuální rozdíly mezi participanty.

7.4.4 Analýza dat (PS4)

Analýza dat v PS4 byla založena na kombinaci dvou zdrojů dat: **logovaných interakcí** z aplikace MishPink a **eye-tracking záznamů** pořízených během řešení úloh na stolním počítači a mobilním telefonu. V rámci širšího autorského kolektivu byla hlavní kvantitativní analýza interakčních dat provedena samostatně těmito autory, zatímco autor disertační práce se zaměřil především na zpracování a interpretaci vzniklých eye-tracking dat, jejich kvalitativní inspekci a následné hledání vztahů mezi vizuální pozorností a vybranými interakčními proměnnými. Tato dělba práce byla důležitá i z hlediska zaměření disertace, protože cílem nebylo pouze vyhodnotit rozdíly mezi počítačovým a mobilním prostředím, ale především ověřit, jak lze eye-tracking data využít jako doplňující interpretační vrstvu k detailnímu logování uživatelských akcí.

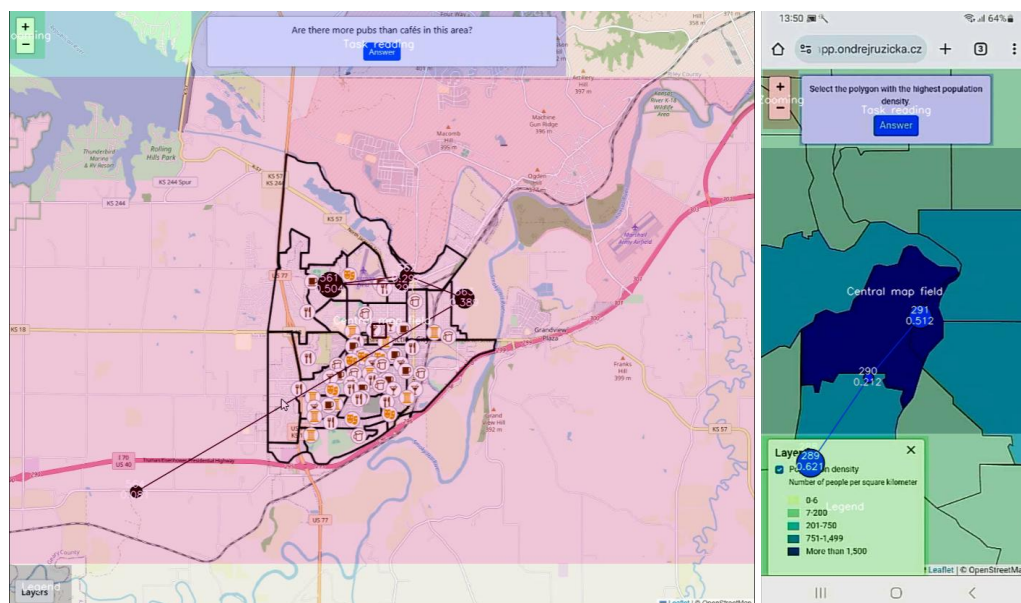
Interakční data byla získána prostřednictvím aplikace MishPink, která během řešení úloh zaznamenávala průběh práce participantů s mapovým rozhraním. Z těchto logů byly v rámci týmové analýzy odvozeny zejména tři základní proměnné: **správnost** odpovědi, **čas** potřebný k dokončení úlohy a **celkový počet interakcí**. Správnost odpovědi byla kódována jako správná, částečně správná nebo nesprávná odpověď, čas řešení byl stanoven z časových značek začátku a konce úlohy a počet interakcí odpovídal celkovému počtu zaznamenaných akcí uživatele. Protože každý participant absolvoval experiment na obou typech zařízení, byla kvantitativní analýza provedena především v párovém rámci *within-subject* přístupu. Pro porovnání zařízení byly použity párové **Wilcoxonovy testy**, při opakovaném testování byla aplikována **Holmova korekce** a velikost efektu byla vyjádřena koeficientem **r**. Dále byly analyzovány také **typy interakcí**, například posun mapy, změna měřítko, otevření pop-up okna, práce s legendou nebo změna viditelnosti vrstvy. Protože mobilní zařízení obecně generovalo vyšší absolutní počet interakcí, byly typy interakcí pro část analýz normalizovány

na proporce v rámci kombinace *participant* × *zařízení* × *úloha*. Tím bylo možné sledovat nejen to, kolik interakcí uživatel provedl, ale také jak byla jeho interakční aktivita strukturálně rozložena mezi různé typy akcí.

Tato **kvantitativní analýza interakcí** ukázala, že rozdíly mezi zařízeními nebyly patrné ani tak ve výsledné úspěšnosti odpovědí, ale spíše ve **způsobu práce s mapou**. V případě počtu interakcí byly rozdíly mezi počítačem a mobilním zařízením statisticky významné u všech úloh i po Holmově korekci; mediánové rozdíly se pohybovaly od –7 do –33 akcí u kartogramových úloh a od –9 do –13 akcí u úloh s bodovými znaky, přičemž velikosti efektu byly velké. Mobilní zařízení tedy vyžadovalo vyšší počet uživatelských akcí, zatímco čas řešení zůstal mezi zařízeními relativně srovnatelný. Navazující analýza typů interakcí ukázala, že mobilní prostředí vedlo spíše ke kontinuální navigaci v mapě, zejména k častějšímu posunu mapového pole, zatímco počítačové prostředí podporovalo cílenější práci s informací, například prostřednictvím pop-up oken. Eye-tracking část, zpracovaná autorem disertační práce, byla následně využita k vysvětlení těchto kvantitativních vzorců a k identifikaci strategií, které samotné interakční logy nedokázaly plně objasnit.

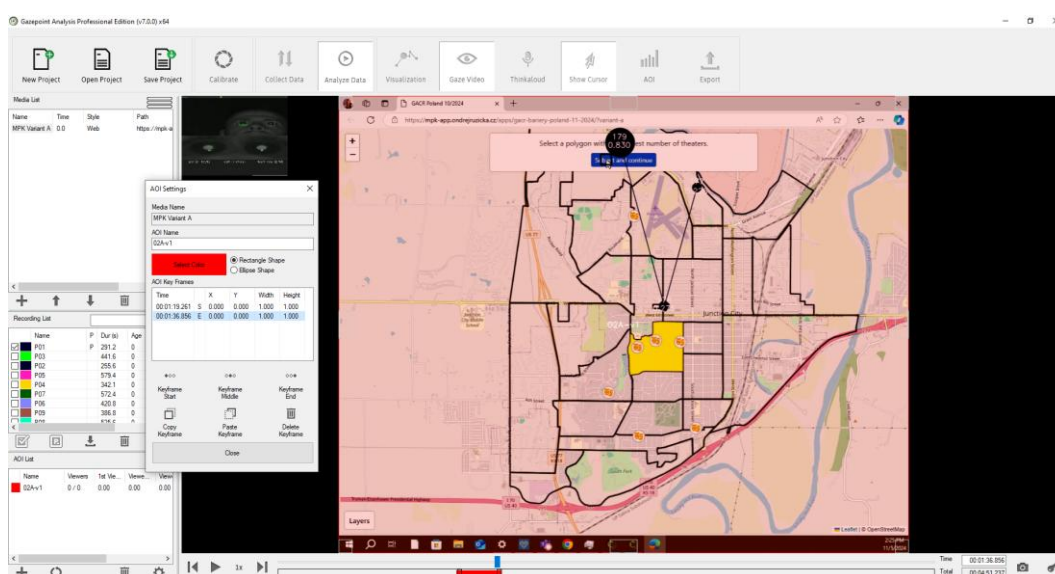
Eye-tracking data byla analyzována v prostředí **Gazepoint Analysis Professional v7.0.0**. Původním záměrem bylo kvantitativně a kvalitativně analyzovat vizuální pozornost uživatelů vůči hlavním částem interaktivního mapového rozhraní, zejména vůči zadání úlohy, tlačítku odpovědi, legendě, ovládání měřítka, centrálnímu mapovému poli a dalším prvkům relevantním pro řešení úloh. Na začátku zpracování se však ukázalo zásadní **softwarové omezení**. V Gazepoint Analysis Professional jsou oblasti zájmu definovány globálně na úrovni stimulu, nikoliv individuálně pro konkrétního participanta. V daném experimentu přitom každý participant pracoval s jinou variantou úloh a výstupem byl pro každého participanta samostatný videozáznam. Nebylo proto možné vytvořit jednotnou sadu AOI, která by byla platná napříč všemi participanty a zároveň by přesně odpovídala poloze prvků v jejich konkrétním záznamu. Pokud by byly detailní AOI vytvořeny pouze jednou pro celý stimul, jejich hodnoty by u dalších participantů postrádaly význam, protože by zasahovaly jiné části obrazu.

První testovací postup proto spočíval v ručním vytvoření samostatných AOI pro každého participanta a pro všechny podstatné prvky obrazovky (**Obrázek 83**). Tento postup byl ověřen na vybraném participantovi v počítačové i mobilní variantě. Ukázalo se však, že detailní vymezení AOI pro jeden videozáznam zabralo přibližně jednu hodinu práce. Konkrétně u participanta P28 trvalo vytvoření detailních AOI v desktopové variantě 58 minut a ve smartphone variantě 50 minut. Při aplikaci tohoto postupu na celý soubor participantů by ruční tvorba AOI zabrala přibližně 84 hodin čistého času. Kromě časové náročnosti se ukázalo také další omezení softwaru v tom, že Gazepoint Analysis umožňoval vytvářet pouze obdélníkové nebo eliptické AOI, což znemožňovalo přesně vymezit nepravidelné hranice mapového pole, polygonů nebo dalších prostorově složitějších prvků rozhraní. Detailní AOI analýza tak byla metodologicky zajímavá, ale pro rozsah této studie prakticky neefektivní. **Obrázek 83** tak dokumentuje původně zamýšlený způsob analýzy, v němž měly být samostatně vymezovány hlavní prvky rozhraní, například zadání úlohy, odpověď, legenda, ovládací prvky a centrální mapové pole a také to, že u mobilního prostředí bylo vymezování AOI komplikováno menší plochou displeje, překryvy rozhraní a proměnlivou polohou mapového obsahu během interakce.



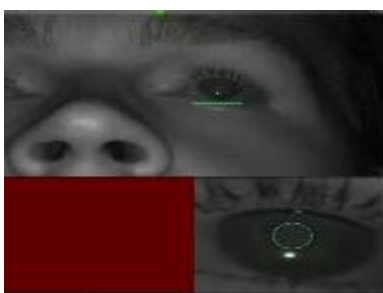
Obrázek 83: Příklad detailního vymezení oblastí zájmu v počítačové (vlevo) a mobilní (vpravo) variantě záznamu.

Z těchto důvodů byl zvolen zjednodušený, a z hlediska rozsahu dat proveditelný postup. Pro každého participanta a každou úlohu byla vytvořena **jedna AOI pokrývající celou obrazovku**, respektive celý záznam řešení dané úlohy (**Obrázek 84**). Tato strategie neumožnila detailně rozlišit pohled na jednotlivé části rozhraní, ale umožnila získat kvantitativní údaje na úrovni úloh, zejména počet fixací, délku záznamu v dané úloze a u počítačové varianty také počet kliknutí zaznamenaný v prostředí Gazepoint. Průměrný čas potřebný k vytvoření AOI pro jednoho participanta se díky tomuto postupu snížil přibližně na 5 až 10 minut. Jednotlivé AOI byly pojmenovány podle identifikátorů úloh, například 01A-v1, 03B-v2 nebo 05A-v1, aby bylo možné jejich výstupy následně propojit s úlohami a s tabulkou interakčních dat.



Obrázek 84: Příklad zjednodušené oblasti zájmu vytvořené pro jednu úlohu jednoho participanta.

Současně byly během zpracování identifikovány **technické komplikace**, které významně ovlivnily interpretaci eye-tracking dat, zejména u mobilní části experimentu. Při záznamu mobilního telefonu pomocí zařízení Gazepoint GP3-Mobile se jako zásadní limit ukázalo **úzké zorné pole** infračervené kamery. I drobný pohyb hlavy mimo optimální polohu mohl způsobit výpadek signálu nebo výrazné zkreslení záznamu. V některých případech proto počet fixací v mobilní variantě nemusel plně odpovídat skutečnému průběhu vizuální pozornosti. Jako poškozené nebo dále nezpracovatelné byly označeny tři počítačové záznamy, konkrétně P09, P10 a P22, a sedm mobilních záznamů, konkrétně P02, P08, P10, P15, P18, P19 a P25. Dále se objevily dílčí problémy s výpadky signálu při vychýlení hlavy mimo pole záběru, především u mobilního zařízení (**Obrázek 85**), a také problémy se záznamem jednoho oka v důsledku brýlí nebo odrazů. Tyto komplikace byly zohledněny při interpretaci výsledků a problematické záznamy nebyly využívány jako plnohodnotný podklad pro navazující korelační analýzu.



Obrázek 85: Ukázka typického problému ztráty dat, když je hlava účastníka vychýlena mimo záběr.

Výstupem eye-tracking zpracování bylo několik typů souborů. Pro jednotlivé participanty byly vytvořeny **soubory Pxx.csv s vypočtenými metrikami**, dále soubory *Pxx_all_gaze.csv* a *Pxx_fixations.csv* obsahující **surová data** využitelná například pro navazující sekvenční vizualizace v nástroji GazePlotter. Souhrnným pracovním výstupem byla **excelovská tabulka**, která obsahovala kvantitativní údaje z exportovaných CSV souborů, zejména **čas sledování**, **počet fixací** a vybrané **interakční proměnné** pro jednotlivé úlohy, participanty a zařízení; a dále **kvalitativní poznámky vzniklé expertní inspekcí videozáznamů**, tedy popis toho, jak participant postupoval, zda pracoval s legendou, zda využíval pop-up okna, zda měnil strategii, zda opakovaně četl zadání nebo zda došlo k evidentnímu nepochopení úlohy. Tím vznikl datový podklad, který propojoval kvantitativní metriky vizuální pozornosti s kvalitativní interpretací chování uživatele.

Kvalitativní inspekce záznamů ukázala několik opakujících se vzorců chování. Výrazné rozdíly byly patrné zejména v práci s legendou a přepínáním viditelnosti vrstev. Část participantů **legendu nepoužívala vůbec** nebo ji využila **pouze v trénovací úloze**, zatímco jiní participanté ji **používali selektivně**, typicky pouze u kartogramových vrstev a nikoliv u vrstev bodových znaků – bylo zaznamenáno, že 21 participantů v počítačové variantě a 20 participantů v mobilní variantě používalo legendu právě pouze u kartogramových vrstev. Systematické využívání legendy napříč úlohami bylo spíše výjimečné a týkalo se jen menší skupiny participantů, například P01, P04, P07, P16, P24 a P28. Práce s legendou byla přitom důležitá především u úloh 03B a 05A, kde bylo nutné porovnávat více jevů nebo vrstev a kde aktivní přepínání vrstev mohlo výrazně usnadnit řešení.

Dalším důležitým prvkem byla **pop-up okna**, která sloužila jako klíčový prostředek pro získávání konkrétních hodnot po kliknutí na mapový prvek. V kvalitativní inspekci se ukázalo, že pop-up okna používali účastníci napříč platformami i úrovněmi zkušenosti **velmi často** a v některých případech představovala prakticky jediný interaktivní prvek, s nímž pracovali. Naopak přepínání vrstev, filtrování bodových kategorií nebo systematické porovnávání více vrstev nebylo samozřejmé pro všechny účastníky. U většiny uživatelů bylo možné pozorovat intuitivní používání zoomu a posunu mapy, avšak část účastníků, například P34, P36 nebo P43, tyto funkce používala jen sporadicky. V mobilním prostředí bylo častější průběžné přibližování a posouvání mapy, což odpovídalo menší ploše displeje a nutnosti pracovat s omezeným výřezem mapového obsahu.

Kvalitativní poznámky zároveň pomohly vysvětlit rozdíly, které nebyly zřejmé pouze z logovaných interakcí nebo časů řešení. U některých účastníků bylo patrné rychlé a spíše intuitivní odpovídání bez hlubší práce s mapou, například u P34, P40 nebo P13. Jiní účastníci se naopak opakovaně vraceli k zadání, dlouho vizuálně prohledávali mapu a opakovaně ověřovali hodnoty, například P05, P14 nebo P18. Výrazné problémy se objevily zejména u úlohy 03A, která vyžadovala porovnání dvou polygonů v mapě. U některých účastníků, například P20 nebo P03, bylo zřejmé nepochopení toho, jak má být porovnání provedeno. Tyto případy ukázaly, že delší čas řešení nebo vyšší počet interakcí nemusí nutně znamenat vyšší pečlivost nebo lepší strategii, ale mohou odrážet nejistotu, nepochopení zadání nebo neefektivní postup.

Na základě získaných dat byly dále provedeny doplňkové **korelační výpočty** mezi eye-tracking metrikami a vybranými interakčními proměnnými. Z analýzy byly vyřazeny poškozené záznamy a trénovací úlohy, aby výpočet lépe odpovídal hlavní experimentální baterii. Prázdné hodnoty u interakčních proměnných byly interpretovány jako nulový výskyt dané akce pouze v případech, kdy byl pro danou úlohu dostupný validní čas a počet fixací. Výpočty byly provedeny zvlášť pro počítačovou a mobilní část. V počítačové části bylo zahrnuto 350 task-level záznamů a v mobilní části 315 task-level záznamů. Vzhledem k tomu, že opakované úlohy u téhož účastníka nejsou plně nezávislá pozorování, byly korelace interpretovány explorativně a doplněny také agregovaným pohledem na úrovni *participant × zařízení*.

Nejsilnější vztah byl podle očekávání zjištěn **mezi počtem fixací a délkou sledování úlohy**. Na úrovni jednotlivých úloh dosáhla korelace u počítače hodnoty Pearson $r = 0,981$ a Spearman $\rho = 0,956$, u mobilního telefonu Pearson $r = 0,967$ a Spearman $\rho = 0,964$. Tento vztah je však metodologicky očekávatelný, protože delší řešení úlohy přirozeně generuje více fixací. Z hlediska interpretace uživatelského chování jsou proto zajímavější vazby mezi počtem fixací a konkrétními interakčními proměnnými. V počítačové části byl zjištěn **středně silný až silnější vztah** mezi **počtem fixací a počtem kliknutí zaznamenaných** v softwaru Gazepoint, a to Pearson $r = 0,700$ a Spearman $\rho = 0,385$ na úrovni úloh. Po agregaci na úroveň *participant × zařízení* zůstal vztah slabší, ale stále patrný, Pearson $r = 0,431$ a Spearman $\rho = 0,376$. To naznačuje, že účastníci s vyšším počtem fixací měli tendenci provádět více kliknutí, avšak tento vztah nebyl pouze mechanický; významnou roli zřejmě hrála také strategie řešení a typ úlohy.

Výrazný vztah byl zjištěn také **mezi počtem fixací a využíváním pop-up oken**. U počítačové části dosáhla korelace na úrovni úloh hodnoty Pearson $r = 0,614$ a Spearman $\rho = 0,441$,

u mobilní části Pearson $r = 0,458$ a Spearman $\rho = 0,401$. Tento výsledek odpovídá kvalitativnímu pozorování, podle něhož pop-up okna představovala hlavní prostředek získávání atributových informací. Participant, kteří častěji otevírali pop-up okna, zpravidla také **déle vizuálně** kontrolovali mapový obsah a vykazovali vyšší počet fixací. V mobilní části je tento vztah zvláště interpretačně významný v tom, že pop-up okna na menším displeji častěji překrývala mapové pole a vyvolávala sekvence typu „*zkontrolovat hodnotu* → *upravit zobrazení* → *znovu zkontrolovat*“. Tohle je i v souladu s interpretací interakčních dat autorského kolektivu, že mobilní prostředí obecně podporovalo iterativnější a navigačně členitější postup řešení.

Pro orientační souhrn byla dále vytvořena proměnná „**vybrané interakce**“, která v počítačové části zahrnovala kliknutí, otevření legendy, skrytí vrstvy a pop-up okna, zatímco v mobilní části zahrnovala pouze proměnné dostupné v pracovním souboru, tedy otevření legendy, skrytí vrstvy a pop-up okna. Tato proměnná proto není mezi zařízeními přímo srovnatelná, ale je využitelná pro orientační posouzení vztahu mezi vizuální aktivitou a zaznamenanými interakčními událostmi v rámci každé platformy zvlášť. Na úrovni úloh dosáhla korelace mezi počtem fixací a vybranými interakcemi hodnoty Pearson $r = 0,661$ a Spearman $\rho = 0,348$ u počítače a Pearson $r = 0,345$ a Spearman $\rho = 0,232$ u mobilního telefonu. Po agregaci na úroveň **participant × zařízení** byl vztah slabší, zejména u mobilního telefonu, což ukazuje, že samotný počet fixací nelze jednoduše chápat jako přímý ukazatel interakční aktivity. Vizuální pozornost a interakce spolu souvisejí, ale jejich vztah je zprostředkován typem úlohy, použitou strategií, velikostí displeje a dostupností interaktivních prvků.

Z hlediska jednotlivých úloh se jako nejnáročnější z pohledu eye-tracking metrik projeví zejména úlohy vyžadující porovnání více vrstev nebo komplexnější rozhodování. V počítačové části vykazovala nejvyšší průměrný počet fixací úloha 03B, tedy srovnání změny počtu zaměstnanců v cestovním ruchu mezi roky 2010–2020, kde bylo v průměru zaznamenáno přibližně 132 fixací na úlohu. Následovala plánovací úloha 05A s přibližně 110 fixacemi a srovnávací úloha 03A s přibližně 93 fixacemi. Podobný vzorec se objevil i u mobilní části, kde měla nejvyšší hodnotu opět úloha 03B s přibližně 108 fixacemi, následovaná úlohou 05A s přibližně 93 fixacemi a úlohou 03A s přibližně 89 fixacemi. Tyto hodnoty podporují interpretaci, že náročnost úloh nebyla dána pouze typem zařízení, ale především požadavkem na kombinaci vizuálního vyhledávání, porovnávání hodnot, práce s vrstvami a rozhodování.

Celkově analýza dat v PS4 ukázala, že samotná interakční data poskytla **robustní kvantitativní popis** toho, jak se lišilo používání mapového rozhraní mezi počítačem a mobilním zařízením, zatímco eye-tracking data umožnila tyto rozdíly interpretovat z hlediska vizuální pozornosti, nejistoty a uživatelských strategií. Přínos práce autora disertační práce spočíval zejména ve zpracování obtížně analyzovatelných eye-tracking záznamů z dynamického interaktivního prostředí, v identifikaci limitů softwaru Gazepoint Analysis Professional, v návrhu proveditelného task-level AOI postupu, ve vytvoření souhrnné kvantitativní a kvalitativní tabulky a v doplnění interakčních výsledků o expertní interpretaci vizuálního chování participantů. Studie zároveň ukázala, že u interaktivních kartografických vizualizací nelze eye-tracking chápat pouze jako zdroj izolovaných metrik, ale spíše jako interpretační vrstvu, která v kombinaci s logováním interakcí umožňuje rekonstruovat proces řešení úlohy, odlišit efektivní strategii od nejistého postupu a lépe porozumět tomu, proč se stejné mapové úlohy chovají odlišně na stolním a mobilním zařízení.

7.4.5 Hlavní zjištění (PS4)

Tato případová studie ukázala, že při hodnocení IKV není dostačující sledovat pouze výsledný výkon uživatele, tedy správnost odpovědi nebo celkový čas řešení úlohy. Tyto metriky sice poskytují základní informaci o efektivitě a úspěšnosti práce s mapou, ale samy o sobě jen omezeně vysvětlují, jakým způsobem uživatel k odpovědi dospěl. Hlavní přínos studie proto spočíval **v procesním pohledu na práci s interaktivní mapou**. Logovaná interakční data umožnila zachytit konkrétní průběh řešení úloh, zatímco eye-tracking záznamy poskytly interpretační vrstvu pro vysvětlení strategií, nejistoty, opakovaného čtení zadání, práce s legendou, využívání pop-up oken nebo nepochopení některých úloh. Studie tak potvrdila, že u interaktivních map je nutné sledovat nejen výsledek, ale i strukturu uživatelského chování během řešení.

Z hlediska samotných výsledků se ukázalo, že **typ zařízení neměl zásadní vliv** na správnost odpovědí a pouze omezeně se promítal do času řešení. Podstatné rozdíly se však projevíly **v počtu a skladbě interakcí**. Mobilní zařízení vedlo k vyššímu počtu uživatelských akcí a k navigačně orientovanému způsobu práce, založenému především na častějším posunu mapy, přibližování a postupném upravování výřezu. Naproti tomu práce na počítači měla častěji charakter cílenějšího získávání informací, zejména prostřednictvím klikání na prvky, otevírání pop-up oken a práce s vrstvami. To znamená, že rozdíl mezi počítačovým a mobilním prostředím nespočíval primárně v tom, zda uživatel úlohu vyřešil správně, ale v tom, jakou interakční strategii při řešení zvolil. Tento závěr je pro hodnocení interaktivních map zásadní v tom, že ukazuje, že agregované výkonnostní metriky mohou skrývat významné rozdíly v procesu práce s mapovým rozhraním.

Z metodologického hlediska se jako velmi důležité ukázalo **logování interakcí**. Tato studie prokázala, že interakční data mohou být u IKV samostatně velmi silným zdrojem informací. Umožňují kvantifikovat počet akcí, sledovat typy použitých interakcí, zachytit práci s vrstvami, pop-up okny a navigačními nástroji a rekonstruovat průběh řešení úloh. V některých případech mohou interakční logy částečně nahradit eye-tracking, zejména tam, kde je cílem zjistit, jak uživatel s mapovým rozhraním manipuloval. Je však vhodnější chápat je jako metodu komplementární, nikoliv jako plnohodnotnou náhradu eye-tracking metody. Interakce totiž ukazují, co uživatel provedl, zatímco eye-tracking pomáhá interpretovat, čemu věnoval pozornost, zda váhal, opakovaně kontroloval zadání, zda přehlédl relevantní prvek nebo zda zvolil neefektivní strategii. Největší interpretační hodnotu proto měla právě kombinace obou zdrojů dat.

Eye-tracking část studie přinesla několik podstatných metodologických zjištění. Prvním z nich bylo potvrzení, že analýza eye-tracking dat z dynamického a interaktivního webového prostředí je výrazně složitější než analýza statických mapových stimulů. Původně zamýšlená detailní AOI analýza jednotlivých prvků rozhraní se ukázala jako prakticky neefektivní, protože Gazepoint Analysis Professional pracoval s AOI globálně na úrovni stimulu, nikoliv individuálně pro konkrétního účastníka a konkrétní variantu úlohy. Vzhledem k tomu, že každý účastník pracoval s vlastní videonahrávkou a s jinou variantou úloh, nebylo možné vytvořit jednu univerzální sadu AOI. Test detailního vymezování AOI navíc ukázal vysokou časovou náročnost, přibližně 58 minut pro desktopovou a 50 minut pro mobilní variantu u jednoho účastníka, což by při rozšíření na celý soubor představovalo přibližně 84 hodin

práce. Dalším omezením byla možnost vytvářet **pouze obdélníkové nebo eliptické AOI**, což neodpovídalo nepravidelné povaze mapového pole a proměnlivému obsahu interaktivní mapy. Výsledným metodologickým řešením bylo vytvoření zjednodušených AOI na úrovni jednotlivých úloh, které pokrývaly celou obrazovku. Tento přístup neumožnil detailně oddělit pohled na legendu, mapové pole, zadání nebo ovládací prvky, ale umožnil získat srovnatelné task-level metriky, zejména počet fixací, délku sledování a u počítačové varianty také počet kliknutí. Z hlediska disertační práce bylo podstatné, že tento postup představoval **praktický kompromis** mezi metodologickou přesností a reálnou proveditelností analýzy. Ukázal, že u dynamických mapových stimulů může být detailní kvantitativní AOI analýza v běžném komerčním softwaru velmi obtížná, zatímco kombinace hrubších kvantitativních ukazatelů s kvalitativní inspekci záznamů může poskytnout užitečný a interpretovatelný výsledek.

Dalším významným zjištěním byly **technické limity** eye-tracking přístupu u mobilní části. U zařízení Gazepoint GP3-Mobile se jako zásadní problém projevil úzký zorný úhel infračervené kamery, kdy i menší pohyb hlavy mimo optimální polohu vedl ke ztrátě signálu nebo zkreslení záznamu. Z tohoto důvodu musely být některé záznamy vyřazeny jako poškozené nebo dále nezpracovatelné. Tento problém potvrzuje, že mobilní eye-tracking sice umožňuje testovat práci s mapou v přirozenějším dotykovém prostředí, ale současně přináší vyšší nároky na stabilitu participanta, kontrolu laboratorních podmínek a následnou kontrolu kvality dat. Pro disertační práci je tento poznatek důležitý zejména proto, že ukazuje limity přenosu klasických eye-tracking postupů do mobilního a interaktivního prostředí.

Kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů doplnila kvantitativní výsledky o interpretačně důležité informace. Bylo patrné, že participantů se výrazně lišili v práci s legendou, přepínáním vrstev a pop-up okny. Někteří legendu nevyužívali vůbec nebo pouze v trénovací úloze, zatímco jiní ji používali systematicky, zejména u úloh vyžadujících porovnání více vrstev. Záznamy také ukázaly, že pop-up okna představovala prostředek pro získávání atributových hodnot a v některých případech byla jediným interaktivním prvkem, s nímž participant aktivně pracoval. U mobilního zařízení bylo navíc častější průběžné posouvání a přibližování mapy, což odpovídalo omezené velikosti displeje a nutnosti neustále upravovat viditelný výřez mapy.

Důležité bylo také zjištění, že vyšší počet interakcí nebo delší čas řešení nelze automaticky interpretovat jako pečlivější práci s mapou. V některých případech odrážely tyto hodnoty spíše **nejistotu, nepochopení zadání nebo neefektivní strategii**. U části participantů bylo pozorováno rychlé odpovídání po krátké vizuální kontrole mapy, zatímco jiní se opakovaně vraceli k zadání, dlouho prohledávali mapové pole a opakovaně ověřovali hodnoty. Zvláště problematická se ukázala úloha 03A, která vyžadovala porovnání dvou polygonů v mapě. U některých participantů bylo patrné, že nepochopili, jak má být srovnání provedeno. Právě v těchto případech byla inspekce eye-tracking dat důležitá, protože samotné logy by ukázaly pouze zvýšený počet akcí nebo delší čas, nikoliv důvod tohoto chování.

Doplňkové **korelační výpočty** podpořily vazbu mezi vizuální pozorností a interakční aktivitou, ale zároveň ukázaly, že tento vztah není triviální. Nejsilnější vztah byl podle očekávání zjištěn mezi počtem fixací a délkou řešení úlohy, což je metodologicky předpokladatelné. Zajímavější byly vztahy mezi počtem fixací a konkrétními interakčními proměnnými. U počítačové varianty byla zjištěna korelace mezi počtem fixací a počtem kliknutí, stejně jako mezi počtem fixací a využíváním pop-up oken. Podobný, i když slabší vztah se projevil také u mobilní varianty v případě pop-up oken. Tyto výsledky naznačují, že častější

interakční práce s mapou byla spojena s intenzivnější vizuální kontrolou, ale její podoba závisela na typu zařízení, úloze a zvolené strategii. Nejnáročnější z hlediska počtu fixací byly úlohy 03B, 05A a 03A, tedy úlohy vyžadující porovnání více vrstev, komplexnější rozhodování nebo prostorové srovnání. To podporuje interpretaci, že náročnost interaktivní mapové úlohy není dána pouze typem zařízení, ale především kombinací vizuálního vyhledávání, práce s vrstvami, porovnávání hodnot a rozhodování.

Celkově PS4 potvrdila, že logování interakcí je pro hodnocení IKV **mimořádně užitečné**. Ve srovnání s eye-tracking přístupem je technicky méně náročné, snáze škálovatelné, použitelné i v responzivním webovém prostředí a potenciálně vhodné také pro vzdálené nebo rozsáhlejší experimenty. Současně však tato studie ukázala, že interakční logy nemohou samy o sobě plně vysvětlit vizuální a kognitivní stránku řešení úlohy. Nejvhodnější je proto metodologická **triangulace**, v níž interakční data poskytují přesnou časovou a behaviorální kostru řešení úlohy a eye-tracking doplňuje interpretaci vizuální pozornosti, nejistoty a uživatelských strategií. Tato kombinace se ukázala jako zvláště vhodná u interaktivních map, kde se obsah obrazovky během řešení mění a kde klasické statické AOI postupy narážejí na technické i analytické limity.

Případová studie PS4 tak uzavřela jednu z důležitých metodologických linií celé sady případových studií. Zatímco předchozí studie ukázaly možnosti a limity metody eye-tracking při hodnocení jednodušších i složitějších interaktivních kartografických vizualizací, PS4 zdůraznila význam interakčních dat jako samostatného a současně komplementárního zdroje poznání. Ukázala, že u interaktivních map je vhodné přesunout pozornost od izolovaného hodnocení výsledku k analýze procesu práce s mapou. Pro další výzkum z toho vyplývá, že kombinace eye-tracking přístupu, logování interakcí a kvalitativní inspekce záznamů představuje perspektivní přístup k porozumění tomu, jak uživatelé skutečně pracují s interaktivními kartografickými vizualizacemi na různých typech zařízení.

Veškerá podkladová data pro PS4 jsou k dispozici v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP a dále na datovém úložišti disertační práce (viz kapitola Přílohy).

PS5

7.5 Interaktivní 3D aplikace „3D-Geo-Vis“ (PS5)

Hodnocený produkt	interaktivní webová 3D aplikace 3D-Geo-Vis
Základní metody	eye-tracking (kvalitativní inspekce záznamů), výpočet metrik použitelnosti , logování interakcí (<i>MapLogger</i>), UEQ , doplňkový dotazník
Použité zařízení	Tobii Pro Spark (stacionární)
Hlavní nástroje	MapLogger, Tobii Pro Lab, Microsoft Excel (UEQ)
Počet úloh	5
Počet participantů	54

Tato PS5 představovala závěrečnou a metodologicky nejkomplexnější část celé sady pěti případových studií realizovaných v rámci této disertační práce. Zatímco předchozí studie postupně ověřovaly možnosti analýzy jednodušších interaktivních map, komplexnějších webových mapových aplikací, statických a digitálních atlasů i samotných interakčních logů, tato studie již propojila většinu získaných metodologických zkušeností do **jednoho uceleného evaluačního rámce**. Hodnoceným produktem byla webová 3D aplikace „3D-Geo-Vis“, vytvořená Mgr. Jakubem Žejdlíkem z Katedry geoinformatiky UP v rámci jeho disertační práce. Aplikace byla navržena jako prostředí pro interaktivní tematickou 3D geovizualizaci teploty vzduchu prostřednictvím sedmi metod zobrazení a umožňovala uživatelům v reálném čase upravovat vybrané grafické proměnné v pravém ovládacím panelu. Protože aplikace vyžadovala empirické ověření použitelnosti a současně dobře odpovídala zaměření této disertační práce na hodnocení IKV, byla využita jako hlavní případová studie, v níž byly cíleně kombinovány konkrétní metody pro konkrétní typy zjištění: eye-tracking pro interpretaci vizuální pozornosti a obtíží při orientaci v rozhraní, MapLogger pro záznam skutečně provedených interakcí, standardizovaný dotazník UEQ pro hodnocení uživatelského prožitku a doplňující subjektivní dotazník pro zachycení demografického kontextu, předchozích zkušeností a otevřených komentářů participantů.

Hlavním metodologickým přínosem této případové studie bylo praktické nasazení nástroje **MapLogger**, který byl pro potřeby testování aplikace 3D-Geo-Vis částečně přizpůsoben a využit nejen jako doplněk k eye-tracking datům, ale také jako samostatný zdroj objektivních behaviorálních dat. MapLogger umožnil z existující webové aplikace sestavit spustitelný experimentální balíček, definovat sekvenci úloh, zobrazovat participantům zadání v jednotné horní liště, zaznamenávat interakce do CSV souborů a následně provádět základní kvantitativní analýzy v prostředí MapLogger Analyser. V rámci studie tak bylo možné propojit informaci o tom, kam se uživatelé dívali, s tím, co v aplikaci skutečně prováděli, jak často interagovali, jaké prvky rozhraní využívali a jak se jejich strategie měnily mezi explorační a cíleně analytickou částí experimentu. Tím tato studie uzavřela celou sadu případových studií nejen z hlediska hodnoceného produktu, ale především z hlediska metodologického vývoje, tedy od dílčích testů použitelnosti a obtížně zpracovatelných eye-tracking záznamů u dynamických

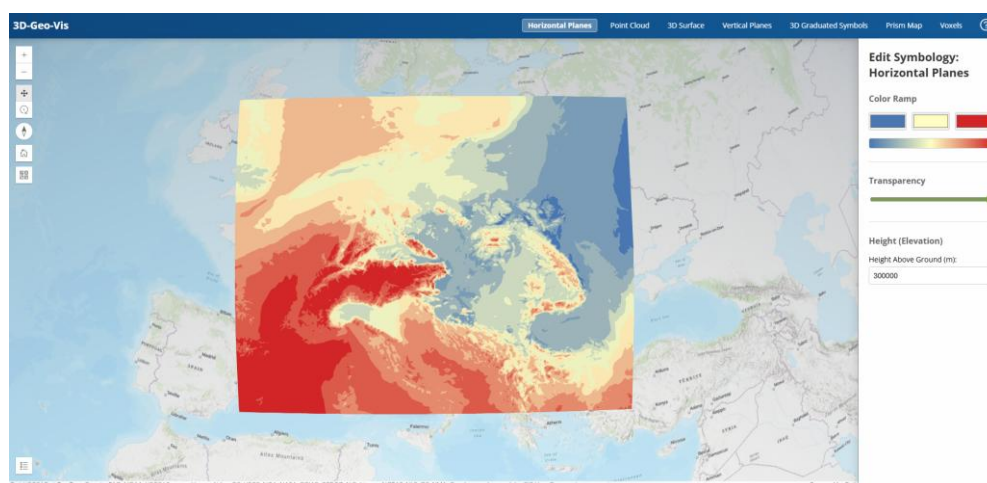
stimulů až po komplexní triangulaci vizuálních, behaviorálních a subjektivních dat v reálném prostředí interaktivní 3D geovizualizační aplikace.

★ [?] Tato PS5 je připravena k odeslání (k 20. 05. 2026) ve formě článku: Žejdlík, J., Vaníček, T., Voženílek, V. *3D-Geo-Vis: A Web-Based Environment for Interactive 3D Thematic Geovisualisation and Its Usability Evaluation* (článek v přípravě).

7.5.1 Hodnocený produkt (PS5)

Hodnoceným produktem v PS5 byla webová mapová aplikace **3D-Geo-Vis**⁴⁶ (Obrázek 86). Aplikace byla navržena jako **experimentální** a současně **prezentační prostředí** pro interaktivní tematickou 3D geovizualizaci, přičemž jejím hlavním účelem bylo demonstrovat a porovnat různé způsoby znázornění kvantitativních prostorových dat ve 3D prostředí. V testované verzi aplikace byla vizualizována data teploty vzduchu, přičemž uživatel mohl stejný jev prohlížet prostřednictvím několika odlišných metod tematické 3D kartografie. Zdrojový kód této aplikace je veřejně přístupný prostřednictvím platformy GitHub⁴⁷.

Z technického hlediska byla aplikace vytvořena s využitím standardní webové architektury HTML/CSS/JavaScript. Toto řešení umožnilo její spuštění v běžném webovém prohlížeči bez nutnosti instalace specializovaného softwaru, což bylo podstatné také z hlediska experimentálního testování. Webové prostředí zároveň odpovídalo obecnému zaměření této disertační práce, protože umožnilo hodnotit interaktivní kartografickou vizualizaci jako běžně dostupný uživatelský produkt, nikoliv pouze jako izolovaný statický kartografický výstup. Z pohledu použitelnosti bylo důležité, že aplikace nevyžadovala pouze čtení mapového obsahu, ale také aktivní manipulaci s rozhraním, volbu vizualizační metody, změnu parametrů znakového klíče a práci s 3D scénou.



Obrázek 86: Náhled na výchozí stav aplikace 3D-Geo-Vis.

⁴⁶ Žejdlík, Jakub. *3D-Geo-Vis* [online]. [b. r.] [cit. 2026-05-18].

Dostupné z: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis/horizontal.html

⁴⁷ Žejdlík, Jakub. *3d_geo_vis* [software]. GitHub [online]. [b. r.] [cit. 2026-05-18].

Dostupné z: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis

Aplikace 3D-Geo-Vis obsahovala sedm metod tematické 3D geovizualizace: **Horizontal Planes, Point Cloud, 3D Surface, Vertical Planes, 3D Graduated Symbols, Prism Map a Voxels**. Každá z těchto metod reprezentovala odlišný způsob převodu kvantitativní tematické informace do 3D prostředí, a tedy i odlišný typ uživatelské interakce, percepční náročnosti a interpretační strategie. Z hlediska experimentu bylo podstatné, že tyto metody nebyly hodnoceny pouze jako různé grafické varianty téhož obsahu, ale jako rozdílné interaktivní kartografické přístupy, které mohly odlišně ovlivňovat orientaci uživatele v aplikaci, efektivitu řešení úloh, míru kognitivní zátěže i subjektivní preference participantů. Tato vlastnost činila z aplikace vhodný objekt pro komplexnější uživatelské testování, protože umožnila sledovat nejen obecnou použitelnost rozhraní, ale také rozdíly v práci s různými typy 3D tematických vizualizací.

Jednotlivé metody byly v testované verzi řešeny jako **samostatné podstránky**, mezi nimiž bylo možné přepínat v horní části uživatelského rozhraní. Největší část obrazovky zabíralo samotné mapové okno, ve kterém byla zobrazena 3D scéna s tematickými daty a podkladovou mapou. Uživatel měl k dispozici základní mapové nástroje, zejména přiblížení a oddálení, pohyb v mapě, rotaci scény, návrat do výchozího pohledu, změnu podkladové mapy a zobrazení legendy. Součástí rozhraní byla také nápověda dostupná prostřednictvím ikony otazníku, která poskytovala informace o ovládání aplikace a jejím obsahu. Vlastní práce s aplikací tedy kombinovala běžné mapové operace s interakcemi specifickými pro 3D prostředí, zejména s rotací, změnou perspektivy a úpravou vybraných vizuálních parametrů.

Klíčovým prvkem aplikace byl **pravý boční panel** určený k interaktivní úpravě znakového klíče. Tento panel umožňoval měnit vybrané grafické proměnné v reálném čase, přičemž nabídka dostupných parametrů se lišila podle právě zvolené vizualizační metody. Uživatel tedy nepracoval se stejnou sadou ovládacích prvků napříč celou aplikací, ale vždy s těmi proměnnými, které byly pro danou metodu relevantní a technicky proveditelné. V praxi šlo například o úpravu barevného schématu, transparency, velikosti znaků, hustoty bodů nebo dalších parametrů ovlivňujících výslednou podobu 3D vizualizace. Důležitou vlastností aplikace bylo, že většina změn byla **aplikována okamžitě**, což podporovalo explorační práci s vizualizací a umožňovalo uživateli průběžně sledovat dopad provedených úprav.

Z hlediska hodnocení použitelnosti byla aplikace 3D-Geo-Vis vhodným, ale současně náročným testovaným produktem. Na rozdíl od jednodušších interaktivních map nešlo pouze o nalezení určité informace v mapě nebo obsluhu několika základních ovládacích prvků. Uživatelé museli porozumět tomu, že aplikace nabízí více samostatných metod zobrazení, že každá z nich má jiné možnosti nastavení a že správná interpretace hodnot ve 3D prostředí často vyžaduje aktivní změnu pohledu, nikoliv pouze statické pozorování mapy shora. Právě tato kombinace tematické kartografie, 3D prostředí, interaktivní úpravy grafických proměnných a běžných mapových operací vytvořila vhodné podmínky pro ověření metodologického rámce založeného na kombinaci eye-tracking přístupu, logování interakcí pomocí nástroje MapLogger a subjektivního hodnocení uživatelského prožitku.

Současně bylo nutné vnímat aplikaci jako **prototypové prostředí**, jehož cílem nebylo nabídnout plně univerzální produkční nástroj pro libovolná data, ale umožnit empirické ověření práce uživatelů s vybranými metodami tematické 3D geovizualizace. Testovaná verze pracovala s předem připravenými daty a jednotlivé vizualizační metody byly odděleny do

samostatných stránek. To sice omezovalo možnost kombinovat více metod v jednom společném zobrazení nebo měnit vstupní datovou sadu, zároveň však takové řešení poskytovalo kontrolované prostředí vhodné pro laboratorní experiment. Výsledky testování proto nebyly interpretovány pouze jako hodnocení konkrétní implementace, ale také jako podklad pro návrh obecnějších doporučení pro tvorbu a testování interaktivních 3D geovizualizačních aplikací.

7.5.2 Zadání úloh a průběh experimentu (PS5)

Testovací scénář PS5 byl navržen jako kombinace úvodní explorační fáze a následných cílených úloh zaměřených na konkrétní aspekty práce s aplikací 3D-Geo-Vis. Cílem nebylo pouze ověřit, zda participant dokázali najít správnou odpověď, ale také sledovat, jakým způsobem se v prostředí orientovali, jak přepínali mezi jednotlivými metodami 3D geovizualizace, jak využívali ovládací prvky pravého panelu a jak pracovali s 3D scénou při interpretaci tematických hodnot. Úlohy byly zadávány **prostřednictvím nástroje MapLogger**, který zároveň zajišťoval jejich průběžné zobrazení ve vrchní liště obrazovky. Zadání tak bylo participantům dostupné po celou dobu řešení, což snížilo nároky na zapamatování instrukce a umožnilo standardizovat průběh testování napříč všemi participanty. Konkrétní znění úloh uvádí **Tabulka 13**.

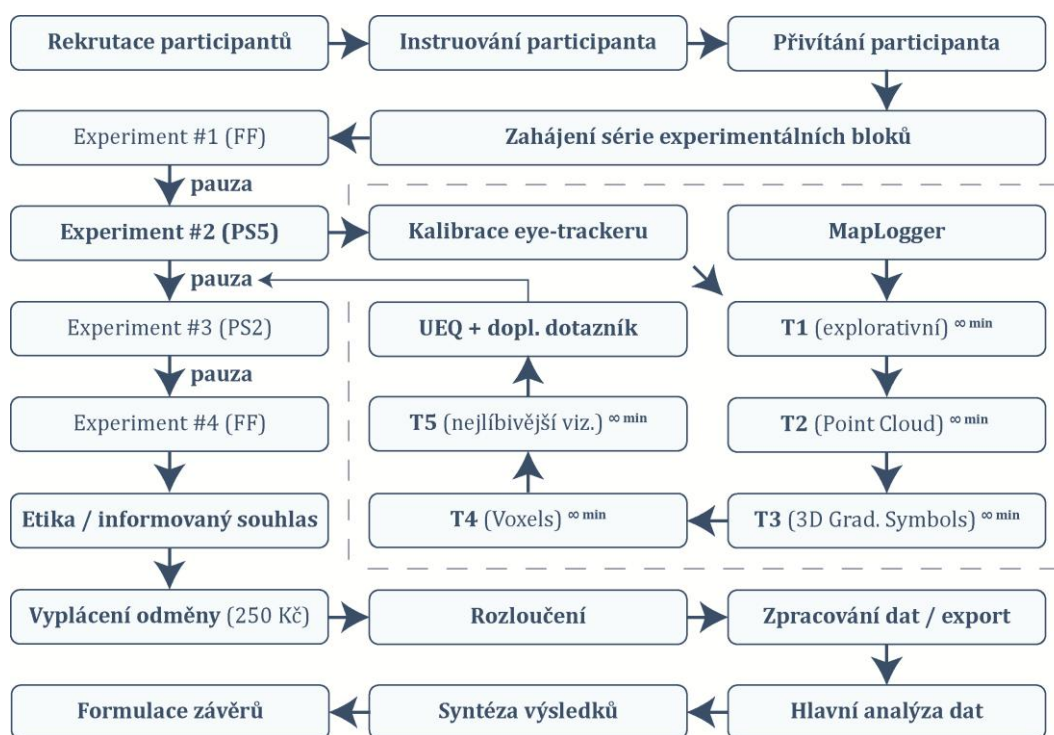
Tabulka 13: Přehled úloh PS5 pro participanty ve dvou variantách

ID úlohy	Typ úlohy	Zadání úlohy	Časový limit
T1	Explorativní	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.	Bez limitu
T2	Vyhledávací	Najděte vizualizaci „Point Cloud“ a zjistěte, jaká je nejvyšší hodnota teploty, kterou tato vizualizace zobrazuje.	Bez limitu
T3	Navigační	Přejděte na vizualizaci „3D Graduated Symbols“. Změňte tvar znaků a následně upravte také jejich průměr (velikost).	Bez limitu
T4	Analytická	Zvolte vizualizaci „Voxels“ a zjistěte rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou teploty.	Bez limitu
T5	Srovnávací	Vyberte vizualizaci, která se Vám líbí nejvíce. Upravte barevné schéma tak, aby se Vám výsledek vizuálně líbil ještě více.	Bez limitu

První úloha měla záměrně otevřený charakter. Sloužila jako vstupní fáze, během níž se participant měli přirozeně seznámit s prostředím aplikace, jejími ovládacími prvky, mapovým oknem, pravým panelem pro úpravu znakového klíče a možností přepínání mezi jednotlivými vizualizačními metodami. Z metodologického hlediska šlo o explorační a orientační úlohu, jejímž cílem nebylo dosažení jediné správné odpovědi, ale vytvoření počátečního mentálního modelu aplikace. Následující čtyři úlohy již měly cílenější charakter. Úloha T2 ověřovala schopnost najít konkrétní vizualizační metodu a extrahovat z ní nejvyšší hodnotu teploty. Úloha T3 byla zaměřena na ovládání parametrů znakového klíče a úpravu způsobu zobrazení dat. Úloha T4 představovala analyticky náročnější zadání, protože vyžadovala nejen výběr metody Voxels a identifikaci hraničních hodnot, ale také jejich porovnání a výpočet rozdílu. Poslední úloha T5 měla subjektivně-preferenční charakter, protože participant měli zvolit vizualizaci, která se jim líbila nejvíce, a následně upravit její barevné schéma podle vlastního estetického úsudku.

Všechny úlohy byly prezentovány ve fixním pořadí bez randomizace. Toto řešení bylo zvoleno proto, aby byl zachován jednotný průběh testování a aby bylo možné porovnávat chování participantů ve stejném sekvenčním kontextu. Současně však bylo nutné při interpretaci výsledků zohlednit, že pozdější úlohy mohly být ovlivněny postupným učením se s rozhraním. Participantů si během prvních úloh mohli osvojit umístění některých ovládacích prvků, princip přepínání mezi metodami nebo práci s pravým panelem, což mohlo následně ovlivnit efektivitu řešení dalších úloh. Tento aspekt byl důležitý zejména při vyhodnocení úspěšnosti, počtu interakcí a doby řešení jednotlivých úloh.

Průběh experimentu schematicky znázorňuje **Obrázek 87**. Testovací prostředí bylo totožné jako v případové studii PS2. Sběr dat probíhal v počítačové učebně na Filozofické fakultě Univerzity Palackého v Olomouci, která byla vybavena pěti stejnými stacionárními eye-trackery Tobii Pro Spark se vzorkovací frekvencí 60 Hz. Toto uspořádání umožnilo současné testování až pěti participantů za standardizovaných technických podmínek. PS5 byla zařazena jako druhý experiment v pořadí v rámci širší série experimentálních bloků. Po prvním experimentu následovala krátká individuální pauza a poté byl zahájen blok PS5, který byl organizačně i technicky oddělen od ostatních částí testování.

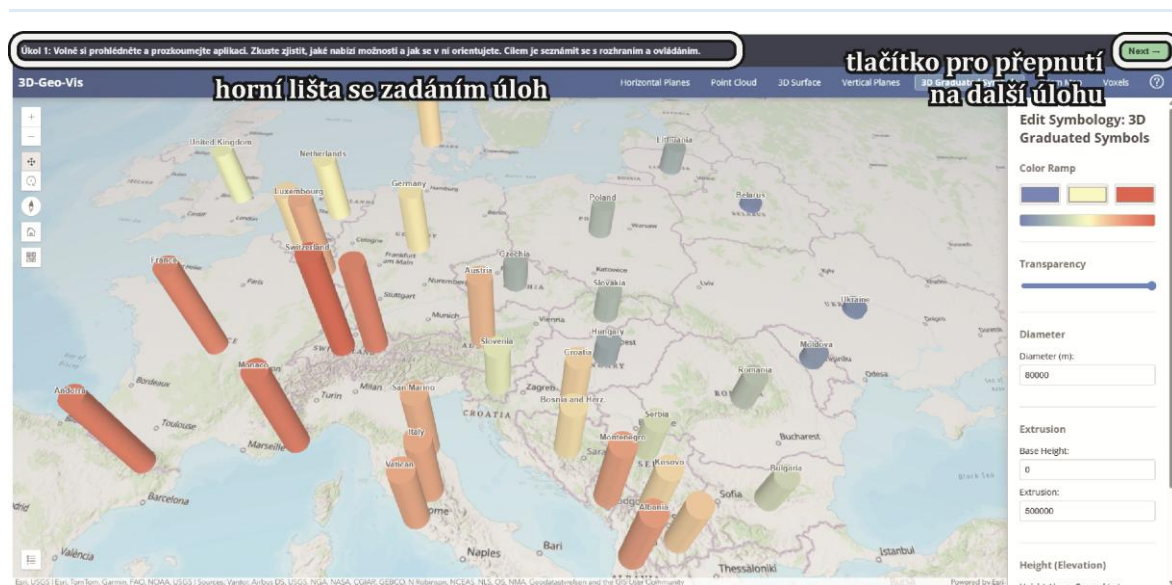


Obrázek 87: Průběh experimentu PS5 v kontextu celé série experimentálních bloků.

Před zahájením samotného testování aplikace 3D-Geo-Vis byla u každého participanta provedena **kalibrace** eye-trackeru. V případech, kdy nebyla dosažena dostatečná přesnost, byla kalibrace opakována. Po úspěšné kalibraci byla aplikace spuštěna moderátorem. Aplikace byla hostována prostřednictvím GitHub Pages a její odkaz byl připraven v předem otevřené složce na testovacím počítači, aby bylo možné minimalizovat prodlevy a nenarušovat kontinuitu experimentálního bloku. Po spuštění se participantovi zobrazila úvodní instrukce, která vysvětlovala, že bude pracovat s webovou mapovou aplikací 3D-Geo-Vis, že má

postupovat přirozeně jako v běžné situaci a že po dokončení každé úlohy má pokračovat kliknutím na tlačítko „Next“.

Po přečtení úvodních instrukcí následoval **výběr úvodní stránky**, respektive počáteční vizualizační metody. Participant si mohli zvolit libovolnou metodu, která se jim zobrazila jako první, nicméně většina ponechala výchozí nastavení a bez dalšího výběru pokračovala k první úloze. Poté probíhalo samotné **plnění pěti úloh T1–T5**. Během celého experimentu MapLogger zaznamenával interakce participantů s aplikací a zároveň poskytoval **stabilní horní lištu** se zadáním aktuální úlohy (**Obrázek 88**). Z hlediska průběhu testování bylo toto řešení důležité, protože umožnilo propojit behaviorální záznamy s konkrétním úlohovým kontextem a současně snížilo riziko, že participant selže pouze kvůli zapomenutí zadání.



Obrázek 88: Náhled na experimentální prostředí (horní lišta se zadáním úlohy a tlačítkem „Next“).

Po dokončení poslední úlohy následovalo **dotazníkové šetření**, které zahrnovalo standardizovaný dotazník **UEQ** a doplňující **subjektivní dotazník**. Tato část umožnila zachytit nejen celkové hodnocení uživatelského prožitku, ale také demografické údaje, předchozí zkušenosti participantů a otevřenou zpětnou vazbu k aplikaci. Po ukončení experimentálního bloku následovala pauza a pokračování v další části série testování. Po absolvování všech experimentálních bloků participanti podepsali etické dokumenty a informovaný souhlas se záznamem a výzkumným využitím dat a následně jim byla vyplacena finanční odměna. Teprve po ukončení sběru dat následovalo zpracování a export dat, hlavní analýza, syntéza výsledků a formulace závěrů.

Z metodologického hlediska byla tato fáze případové studie významná tím, že úlohy nebyly navrženy pouze jako izolované testové otázky, ale jako **řízený scénář umožňující triangulaci několika typů dat**. Eye-tracking poskytoval záznam vizuální pozornosti a umožnil retrospektivně interpretovat nejistotu, váhání či přehlížení prvků rozhraní. MapLogger zachytil konkrétní interakční kroky, jejich časování a vazbu na jednotlivé úlohy. Dotazníková část následně doplnila objektivní záznamy o subjektivní zkušenost participantů. Tím vznikl metodologicky ucelený rámec, který umožnil hodnotit nejen to, zda byla úloha splněna, ale také jakým způsobem k jejímu řešení participant dospěl.

7.5.3 Participantů (PS5)

Této případové studie se zúčastnil stejný soubor participantů jako v případové studii PS2, protože obě studie byly realizovány v rámci jedné společné série testovacích bloků. Celkem bylo do testování aplikace 3D-Geo-Vis zapojeno **54 participantů**. Tento počet odpovídal laboratornímu charakteru studie a současně poskytoval dostatečný základ pro kombinované vyhodnocení eye-tracking dat, interakčních logů, dotazníku UEQ a doplňujícího subjektivního dotazníku. Participantů byli rekrutováni prostřednictvím online registrační tabulky, v níž si vybírali konkrétní hodinový časový blok. Vstupním kritériem byla pouze základní počítačová gramotnost odpovídající běžnému používání počítače a webových aplikací. Nebylo tedy požadováno odborné vzdělání v oblasti kartografie, geoinformatiky ani 3D vizualizace, což bylo důležité vzhledem k cíli studie hodnotit srozumitelnost a použitelnost aplikace také z pohledu běžných uživatelů.

Z hlediska pohlaví tvořilo vzorek **32 žen a 22 mužů**, tedy 59,3 % žen a 40,7 % mužů. Věková struktura byla výrazně koncentrována do mladších kategorií odpovídající univerzitnímu prostředí, v němž probíhal nábor participantů. Nejpočetnější skupinu tvořili participantů ve věku **21–30 let (n = 29; 53,7 %)**, následovaní kategorií **do 20 let (n = 20; 37,0 %)**. Starší věkové skupiny byly zastoupeny pouze okrajově, konkrétně kategorie 31–40 let zahrnovala tři participantů (5,6 %) a kategorie 51 let a více dva participantů (3,7 %). Tuto skutečnost bylo nutné zohlednit při interpretaci výsledků, protože studie primárně reflektovala chování mladších uživatelů, kteří pravděpodobně disponovali vyšší mírou obecné digitální gramotnosti a byli zvyklí pracovat s webovými rozhraními. Obecná zobecnitelnost výsledků na starší uživatelské skupiny je proto dále omezená a případné rozdíly související s věkem jsou chápány spíše deskriptivně než jako statisticky robustní závěry.

Doplňující dotazník zároveň zachycoval předchozí zkušenosti participantů s 3D mapovými aplikacemi. Získaná data ukázala, že vzorek nebyl složen pouze z uživatelů se zkušeností s obdobnými nástroji. Žádnou předchozí **zkušenost s 3D mapovými aplikacemi** uvedlo 11 participantů (20,4 %), základní zkušenost 24 participantů (44,4 %), střední zkušenost 13 participantů (24,1 %) a pokročilou zkušenost šest participantů (11,1 %). Tato skladba tak byla pro účely studie vhodná, protože umožnila sledovat chování uživatelů s různou mírou předchozí obeznámenosti s 3D prostředím. Zároveň všichni participantů uvedli, že pravidelně používají webové mapy, což znamenalo, že hodnocené rozhraní pro ně nebylo zcela odtržené od běžné uživatelské zkušenosti s digitálními mapovými produkty. Rozdíl mezi běžnou zkušeností s webovými mapami a méně častou zkušeností s 3D mapovými aplikacemi byl pro interpretaci výsledků podstatný, protože případné problémy při práci s aplikací 3D-Geo-Vis bylo možné vztahovat spíše ke specifikům 3D tematické geovizualizace než k úplné neznalosti digitálních map obecně.

Účast v testování byla motivována **finanční odměnou**. Participantů v rámci jednoho hodinového bloku absolvovali sérii experimentálních částí, mezi nimiž byla případová studie PS5 zařazena jako druhý experiment v pořadí. Za absolvování celého testovacího bloku byla participantům vyplacena odměna ve výši **250 Kč**. Tato odměna měla motivační charakter, napomohla zajištění dostatečného počtu participantů a současně podporovala jejich ochotu dokončit celý experimentální blok. Po ukončení testování byl participantům předložen informovaný souhlas se záznamem dat a jejich následným výzkumným využitím. Všichni participantů s účastí ve studii a využitím získaných dat souhlasili.

Testovací prostředí bylo totožné jako v případě PS2. Sběr dat probíhal v počítačové učebně na Filozofické fakultě UP, která byla vybavena pěti stejnými stacionárními eye-trackery Tobii Pro Spark se vzorkovací frekvencí 60 Hz. Toto uspořádání umožnilo současné testování až pěti participantů za standardizovaných technických podmínek a zároveň efektivní organizaci sběru dat (**Obrázek 57**). Skutečnost, že PS2 a PS5 sdílely stejný soubor participantů i stejné testovací prostředí, byla metodologicky výhodná, protože umožnila zachovat konzistentní organizační rámec experimentální série.

7.5.4 Analýza dat (PS5)

Analýza dat v PS5 byla založena na **triangulaci** několika vzájemně se doplňujících zdrojů dat. Vzhledem k charakteru hodnocené aplikace 3D-Geo-Vis nebylo vhodné spoléhat pouze na jeden typ výstupu, protože samotné splnění či nesplnění úlohy neposkytovalo dostatečné vysvětlení toho, jakým způsobem participant s aplikací pracovali, které prvky rozhraní přehlíželi, kde docházelo k váhání a jak se proměňovala jejich strategie při práci s různými metodami tematické 3D geovizualizace. Analytický rámec proto kombinoval kvalitativní **inspekci eye-tracking záznamů**, výpočet **základních metrik použitelnosti**, logování interakcí prostřednictvím **nástroje MapLogger**, standardizované hodnocení uživatelského prožitku pomocí **dotazníku UEQ** a doplňující **subjektivní dotazník**. Jednotlivé analytické přístupy byly nejprve zpracovány odděleně a následně byly jejich výsledky syntetizovány při formulaci hlavních zjištění.

Z hlediska konceptu použitelnosti byla analýza vedena ve třech základních rovinách odpovídajících obecnému chápání použitelnosti jako účinnosti, efektivity a spokojenosti uživatele. **Účinnost** byla vyhodnocována především na základě úspěšnosti řešení úloh, tedy podle toho, zda participant dospěl ke správnému nebo alespoň částečně správnému výsledku. **Efektivita** byla posuzována prostřednictvím časové náročnosti a behaviorálních ukazatelů, zejména délky řešení úloh, počtu interakcí a intenzity interakcí v přepočtu na čas. **Spokojenost** a celkové subjektivní vnímání aplikace byly zachyceny prostřednictvím standardizovaného dotazníku UEQ a doplňujících otevřených odpovědí participantů. Tento rámec umožnil odlišit situace, kdy participant sice úlohu formálně splnil, ale dosáhl toho neefektivním, nejistým nebo kompenzačním způsobem, od situací, kdy bylo řešení přímočaré a rozhraní podporovalo intuitivní práci.

První analytickou vrstvu tvořilo **vyhodnocení úspěšnosti úloh**. U explorační úlohy T1 nebyla úspěšnost kódována ve smyslu správné nebo chybné odpovědi, protože cílem této úlohy bylo především zachytit přirozené seznámení s aplikací, spontánní exploraci rozhraní a první uživatelské strategie. U úloh T2–T5 již bylo možné hodnotit výsledek řešení. Úspěšnost byla posuzována podle předem stanoveného zadání úlohy a podle toho, zda participant provedl požadovaný krok nebo dospěl k očekávanému výsledku. V případě potřeby bylo rozlišováno úplné splnění, částečné splnění a nesplnění úlohy. Toto členění bylo důležité zejména u úloh, v nichž participant provedl pouze část požadovaného postupu, například našel správnou vizualizační metodu, ale neprovedl požadovanou úpravu parametru, případně zvolil vhodný postup, avšak nedospěl ke správné interpretaci hodnot. Výpočet úspěšnosti tak nesloužil pouze jako jednoduché procentuální vyjádření výsledků, ale také jako vstupní vrstva pro interpretaci dalších datových zdrojů.

Druhou vrstvu představovaly **metriky efektivity**. Zde byly využity především časové údaje z logovaných dat a záznamů jednotlivých úloh. Pro každého participanta bylo možné určit délku řešení jednotlivých úloh a celkovou délku práce s aplikací. Tyto údaje byly dále interpretovány společně s počtem interakcí, protože samotný čas nemusel jednoznačně vypovídat o obtížnosti. Delší čas mohl znamenat pečlivé zkoumání aplikace, ale také nejistotu, čekání na odezvu systému nebo ztrátu orientace v 3D scéně. Podobně vyšší počet interakcí mohl indikovat aktivní exploraci, ale také opakované neúspěšné pokusy, náhodné zkoušení ovládacích prvků nebo kompenzační navigaci. Z tohoto důvodu byla efektivita interpretována kombinovaně, tedy jako vztah mezi časem, počtem interakcí, typem interakcí, splněním úlohy a kvalitativními poznatky z eye-tracking záznamů.

Specifickou roli v této případové studii sehrál nástroj **MapLogger**. Jedná se o **vlastní open-source nástroj**⁴⁸ vyvinutý pro potřeby **logování interakcí** ve webových mapových aplikacích a pro jejich základní analytické zpracování. MapLogger byl navržen jako lehká, přenositelná a plně klientská vrstva, která umožňuje převést existující webovou mapovou aplikaci do podoby spustitelné studie použitelnosti bez nutnosti zásadních ručních zásahů do zdrojového kódu. Všechny hlavní kroky, tedy příprava studie, záznam interakcí i následná analýza, probíhaly lokálně v běžném webovém prohlížeči. Toto řešení snižovalo technickou bariéru nasazení a zároveň omezovalo rizika spojená s ochranou dat, protože logovaná data nebyla odesílána na externí server.

 **MapLogger**⁴⁹ se skládá ze tří funkčních částí: části **Builder**, klientské **logovací vrstvy** a části **Analyser**. Builder slouží k přípravě experimentu (**Obrázek 89**). Výzkumník do něj nahraje testovanou webovou aplikaci ve formě ZIP balíčku, přičemž je zachována původní adresářová struktura projektu. Builder následně připraví instrumentovanou verzi aplikace, do níž je vložena klientská logovací vrstva. Součástí přípravy je také zadání úloh a úvodní instrukce pro participanty. V případě PS5 byl tímto způsobem připraven studijní balíček aplikace 3D-Geo-Vis, který umožňoval jednotné zobrazení úloh ve vrchní liště a současné logování interakcí napříč jednotlivými stránkami vizualizačních metod.

⁴⁸ **Vaníček, Tomáš.** *MapLogger – Suite (Builder + Analyser): Version 1.0.3* [software]. GitHub [online]. 15. 4. 2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://github.com/VanicekTomas/maplogger>

⁴⁹ **Vaníček, Tomáš.** *MapLogger – Suite: Version 1.0.3* [software]. Olomouc: Katedra geoinformatiky, Univerzita Palackého v Olomouci, 15. 4. 2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://vanicektomas.github.io/maplogger/>

MapLogger Builder

Turn your interactive map into a ready-to-run usability study. Everything happens in your browser.

1) Add your map files

Upload one ZIP that contains your map (HTML, JavaScript, CSS, images, data, fonts). We keep the folder structure and prepare every HTML page for logging. Anything that already loads from the web (e.g., map tiles) can stay as it is.

Drop your ZIP here, or

Choose ZIP

Files (0) · 0 B Remove ZIP

Add a ZIP file with your map.

2) Write participant tasks

Add short tasks in the order you want people to do them (e.g., "Find the nearest pharmacy in Olomouc"). Participants will see them in a fixed bar at the top of the study, and they will be saved to the log.

Take a moment to explore the map and familiarise yourself with the interface. ×

Tasks: 1 + Add task

Welcome message (shown once at the start):

Thanks for taking part. Please read the instructions, then click Start to begin.

This is your short intro. After the participant clicks Start, Task 1 begins.

Preview

Task 1 — Take a moment to explore the map and familiarise yourself with the interface. Next → END

Task 1

This shows the basic flow. The final look depends on the MapLogger client CSS.

☒ Create an entry page (index.html) if it's missing

The entry page shows the task bar and opens your pages inside an iframe. The internal session key is derived from the Output name.

3) Download the study ZIP

Output name:

MapLogger-instrumented

We'll generate a ZIP with your pages plus a ready-to-run entry page and CSV logging.

Create ZIP

This can take a moment — please click once and wait for the download.

Obrázek 89: Náhled na prostředí MapLogger Builder.

Klientská část nástroje MapLogger běží během samotného experimentu. Zajišťuje zobrazení úlohové lišty, přechod mezi úlohami, záznam interakčních událostí a export dat do CSV. Důležitou vlastností je, že každá zaznamenaná událost je ukládána v kontextu aktuální úlohy. Log tedy neobsahuje pouze technickou informaci o tom, že uživatel například kliknul myší nebo použil kolečko, ale také informaci o tom, během které úlohy se daná událost odehrála. Tím se výrazně zvyšuje interpretační hodnota logů, protože jednotlivé akce je možné přímo přiřadit ke konkrétním fázím experimentu. Po dokončení testování participant zadá své identifikační označení a výsledný CSV soubor je pak uložen pod tímto *participant ID*. Vznikne tak samostatný log pro každého participanta, což zjednodušuje následnou správu a párování dat.

Struktura logu byla navržena tak, aby zachytila jak časový, tak úlohový a interakční kontext. Mezi klíčové atributy patří identifikace experimentu, relativní a absolutní časové značky, číslo a text aktuální úlohy, typ události, informace o prvku uživatelského rozhraní, souřadnice interakce, velikost viewportu a doplňující atributy podle typu interakce. U kliknutí je možné zaznamenat například použitý typ tlačítka, u kolečka myši směr a charakter posunu, u klávesnice konkrétní klávesu a případné modifikátory. Doplňkové pole umožňuje ukládat další informace ve strukturované podobě, například URL stránky, délku úlohy nebo technické informace o relaci. Z metodologického hlediska je podstatné, že log obsahuje jak relativní čas od začátku sezení, tak absolutní časovou značku, což vytváří předpoklad pro případnou synchronizaci s jinými datovými zdroji, zejména s eye-tracking záznamy.

Analysér představuje analytickou část nástroje MapLogger. Umožňuje načíst jeden nebo více CSV souborů a provést základní kvantitativní vyhodnocení interakčních dat bez nutnosti okamžitého zpracování v externím statistickém nebo programovacím prostředí. Pro potřeby PS5 byl Analysér použit k deskriptivnímu zpracování logů napříč participanty i úlohami. Nástroj umožňuje filtrovat typy událostí, pracovat s agregovanými i individuálními daty, nastavovat časové intervaly pro analýzu průběhu aktivity a rozlišovat, zda mají být zahrnuty pouze hlavní uživatelské interakce, nebo také technické a meta události související například se začátkem relace, načtením stránky nebo přechodem mezi úlohami.

MapLogger Analysér nabízí několik typů výstupů. Základ tvoří přehled typů interakcí, celkový počet interakcí na participanta, časový průběh interakcí a metriky po jednotlivých úlohách. Dále je možné zobrazovat profily interakcí po úlohách, tedy proporční zastoupení jednotlivých typů akcí v různých fázích experimentu. Pro porovnání strategií participantů je možné využít také boxploty podílů interakčních typů, ternární diagram vybraných typů interakcí, rozbor cílových prvků rozhraní podle HTML tagů, identifikátorů, tříd nebo textů a detailní časovou osu událostí pro konkrétního participanta. Tato časová osa byla užitečná zejména pro rekonstrukci individuálního průběhu řešení úloh a pro vyhledání momentů, které bylo následně možné ověřit v eye-tracking záznamu.

Součástí části Analysér je také možnost **tvorby heatmapy** založené na souřadnicích interakcí a velikosti viewportu. Tato heatmapa není eye-tracking heatmapou, ale vizualizací prostorového rozložení interakčních akcí. Je ji možné překrýt podkladovým screenshotem testovaného rozhraní, což částečně usnadňuje interpretaci toho, které části aplikace byly interakčně nejvíce využívány. Nástroj současně umožňuje **export grafů** do PNG obrázků. Některé výstupy generují také stručný interpretační text, který může sloužit jako orientační podklad pro popis výsledků. V rámci disertační práce však nebyly tyto texty přebírány automaticky; byly vždy revidovány a interpretovány s ohledem na design studie, charakter úloh a další datové zdroje.

Nasazení nástroje MapLogger bylo pro PS5 metodologicky důležité ze dvou důvodů. Zaprvé umožnilo systematicky **zaznamenat skutečné chování participantů** v aplikaci, tedy nikoliv pouze to, kam se dívali, ale také jaké akce provedli. Zadruhé poskytlo **jednotný úlohový rámec**, díky němuž bylo možné analyzovat interakce odděleně pro jednotlivé úlohy. To bylo zásadní zejména u aplikace 3D-Geo-Vis, protože jednotlivé úlohy kladly na uživatele odlišné nároky: volnou exploraci, nalezení konkrétní metody, úpravu parametrů, analytické porovnání hodnot i subjektivní výběr a úpravu vizualizace. MapLogger tak doplnil eye-tracking

o behaviorální stopu, bez níž by bylo obtížné rozlišit, zda participant určitý prvek pouze vizuálně zvažoval, nebo jej skutečně aktivoval.

Eye-tracking data byla v této případové studii využita primárně **kvalitativně**. Před zahájením experimentu byla u každého participanta provedena kalibrace. Během řešení úloh byl kontinuálně zaznamenáván pohled participanta spolu s průběhem práce v aplikaci. Vzhledem k dynamické povaze hodnoceného produktu však nebyla systematicky počítána klasická sada kvantitativních eye-tracking metrik, jako jsou počty a délky fixací v předem definovaných AOI. Důvodem bylo, že aplikace 3D-Geo-Vis umožňovala změny pohledu, rotaci 3D scény, přibližování, oddalování, přepínání mezi vizualizačními metodami i úpravu parametrů v reálném čase. Stabilní vymezení AOI by proto bylo metodologicky problematické, protože poloha, velikost i význam jednotlivých prvků se v průběhu interakce měnily. Přesto by takové možnosti analýzy eye-tracking existovaly, ale byly by velmi pracné (viz PS3).

Namísto toho byla provedena **retrospektivní vizuální inspekce eye-tracking videozáznamů** s překryvem pohledu. Tento postup umožnil sledovat sekvence chování v jejich přirozeném průběhu a interpretovat je v kontextu konkrétní úlohy. Analýza se zaměřovala především na to, jak se participant orientovali při prvním kontaktu s rozhraním, které části aplikace přitahovaly jejich pozornost, jak vyhledávali přepínání mezi vizualizačními metodami, jak přecházeli pohledem mezi mapovým oknem a pravým ovládacím panelem, kdy se vraceli ke čtení zadání úlohy a kde se objevovaly projevy nejistoty nebo dezorientace. Zvláštní pozornost byla věnována situacím, kdy participant opakovaně skenoval rozhraní bez provedení akce, dlouho setrval na určitém prvku, opakovaně kontroloval zadání nebo ztrácel tematický kontext po rotaci či přiblížení 3D scény.

Kvalitativní eye-tracking inspekce byla využita jako interpretační vrstva nad kvantitativními metrikami a interakčními logy. Pokud například MapLogger ukázal vysoký počet kliknutí, časté použití kolečka myši nebo dlouhé trvání úlohy, eye-tracking záznam umožnil ověřit, zda šlo o cílenou exploraci, nejistotu, čekání na odezvu systému, hledání ovládacího prvku nebo nevhodnou strategii práce s 3D scénou. Stejně tak bylo možné interpretovat případy formálně úspěšných úloh, které byly z hlediska procesu řešení problematické. Eye-tracking zde tedy nesloužil primárně ke generování samostatných kvantitativních ukazatelů, ale k porozumění mechanismům chování, které stály za naměřenými hodnotami.

Subjektivní hodnocení uživatelského prožitku bylo realizováno pomocí standardizovaného **dotazníku UEQ**. Ten byl participantům předložen po dokončení všech úloh, aby hodnocení vycházelo z celkové zkušenosti s aplikací. UEQ obsahuje 26 bipolárních položek hodnocených na sedmibodové škále, které jsou následně agregovány do šesti standardních škál: *Attractiveness*, *Perspicuity*, *Efficiency*, *Dependability*, *Stimulation* a *Novelty*. První čtyři škály lze interpretovat především ve vztahu k pragmatické kvalitě, tedy k tomu, jak je produkt srozumitelný, ovladatelný, efektivní a předvídatelný. Škály *Stimulation* a *Novelty* zachycují spíše hedonickou kvalitu, tedy míru motivace, zajímavosti a inovativnosti produktu.

Před samotným vyhodnocením byla data UEQ zkontrolována z hlediska úplnosti a formální správnosti. Jednotlivé položky byly transformovány podle oficiální metodiky UEQ na interval -3 až +3, kde záporné hodnoty reprezentují negativnější hodnocení a kladné hodnoty pozitivnější hodnocení testovaného systému. Následně byly položky agregovány do příslušných škál a vyhodnoceny pomocí deskriptivních statistik. Součástí analýzy bylo

posouzení škálových hodnot, intervalů spolehlivosti, rozložení odpovědí, konzistence měření a benchmarkového srovnání s referenční databází UEQ. Výsledky UEQ nebyly interpretovány izolovaně, ale ve vztahu k behaviorálním a vizuálním datům. Například slabší hodnocení efektivity nebo rychlosti bylo možné dále konfrontovat s délkou řešení úloh, počtem interakcí, pozorovaným čekáním, opakovaným hledáním ovládacích prvků nebo projevy nejistoty v eye-tracking záznamech.

Doplňující subjektivní dotazník navazoval na UEQ a rozšiřoval standardizované hodnocení o informace, které UEQ sám o sobě nezachycuje. Zahrnoval demografické charakteristiky, předchozí zkušenosti participantů s webovými mapami a 3D mapovými aplikacemi, případně další kontextové informace relevantní pro interpretaci chování v experimentu. Součástí byly také otevřené otázky zaměřené na subjektivní komentáře k aplikaci, identifikované problémy a návrhy na její vylepšení. Tyto odpovědi poskytly důležitý doplněk k objektivním datům, protože umožnily zachytit uživatelsky formulované důvody nespokojenosti, nejistoty nebo preference konkrétních vizualizačních metod.

Otevřené odpovědi byly analyzovány kvalitativně a tematicky. Při interpretaci nebyly chápány jako samostatný důkaz o použitelnosti, ale jako vysvětlující vrstva k výsledkům z ostatních metod. Pokud se určitý problém objevil v otevřených komentářích, bylo možné ověřit, zda měl oporu také v interakčních datech nebo v eye-tracking záznamech. Naopak některé problémy, které se projevily v chování participantů, nemusely být v dotazníku explicitně verbalizovány. Právě kombinace deklarované zkušenosti, pozorovaného pohledu a skutečných interakcí proto umožnila přesnější rozlišení mezi problémy rozhraní, problémy porozumění, subjektivní preferencí a individuální strategií konkrétního participanta.

Celkový postup analýzy lze charakterizovat jako postup od samostatných datových vrstev k jejich syntéze. Nejprve byla vyhodnocena úspěšnost úloh a základní metriky použitelnosti. Poté byly zpracovány interakční logy v MapLogger Analyser a identifikovány vzorce chování napříč úlohami a participanty. Následně byly zpětně prohlíženy eye-tracking videozáznamy, které umožnily interpretovat význam vybraných kvantitativních hodnot a zachytit projevy nejistoty nebo dezorientace. Dotazníky UEQ a otevřené odpovědi pak poskytly subjektivní vrstvu hodnocení. Syntéza těchto výstupů byla základem pro formulaci hlavních zjištění případové studie PS5 a pro odvození konkrétních doporučení k úpravě aplikace 3D-Geo-Vis.

Metodologicky byla tato případová studie důležitá tím, že ukázala praktickou použitelnost kombinace eye-tracking metody a interakčního logování při hodnocení komplexního 3D kartografického rozhraní. U dynamických 3D aplikací je čistě AOI-orientovaná analýza výrazně omezená, protože prostorové uspořádání scény ani význam vizuálních prvků nejsou stabilní. MapLogger tento problém částečně kompenzoval tím, že poskytl přesný záznam akcí a úlohový kontext, zatímco eye-tracking umožnil porozumět vizuálnímu a kognitivnímu průběhu řešení. UEQ a doplňující dotazník pak doplnily pohled samotných uživatelů. Výsledkem nebyla pouze sada oddělených metrik, ale komplexní interpretační rámec, který umožnil hodnotit aplikaci jako interaktivní systém, v němž se použitelnost utváří vztahem mezi vizuálním vnímáním, ovládáním, odezvou prostředí, porozuměním kartografické reprezentaci a subjektivní zkušeností uživatele.

7.5.5 Hlavní zjištění (PS5)

Tato případová studie představovala **nejkomplexnější evaluační část** celé sady případových studií, protože v ní byla uplatněna kombinace metod, které byly postupně ověřovány a metodologicky zpřesňovány v předchozích studiích. Hodnocení aplikace 3D-Geo-Vis nebylo založeno pouze na výsledku řešení jednotlivých úloh, ale na propojení několika vrstev dat, tedy kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů, výpočtu úspěšnosti úloh, logování interakcí pomocí nástroje MapLogger, standardizovaného dotazníku UEQ a doplňujícího subjektivního dotazníku. Díky tomu bylo možné posuzovat aplikaci nejen z hlediska toho, zda participanti úlohy zvládli, ale také jakým způsobem k řešení dospěli, jaké prvky rozhraní využívali, kde docházelo k váhání a které aspekty aplikace vyvolávaly vyšší kognitivní nebo interakční zátěž.

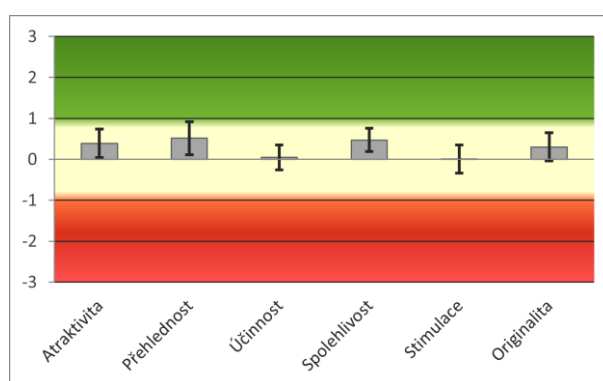
Základní výsledek studie ukázal, že aplikace 3D-Geo-Vis byla pro participanty **obecně použitelná**, avšak její použitelnost byla výrazně ovlivněna kombinací tří faktorů: složitostí 3D tematické vizualizace, strukturou uživatelského rozhraní a technickou odezvou aplikace. Úlohy byly ve většině případů splnitelné, což potvrzuje, že základní koncept aplikace byl funkční a že participanti dokázali s prostředím pracovat. Zároveň se však ukázalo, že úspěšné dokončení úlohy samo o sobě nestačilo jako důkaz bezproblémové použitelnosti. Řada participantů postupovala metodou pokusu a omylu, vracela se k zadání úlohy, hledala požadované funkce v nesprávné části rozhraní nebo se při práci s 3D scénou uchýlovala ke strategiím běžným z 2D mapových aplikací. Tato zjištění jsou důležitá v tom, že ukazují, že hodnocení interaktivních 3D geovizualizačních aplikací musí sledovat nejen výsledek, ale i samotný proces interakce.

Z hlediska **úspěšnosti řešení úloh** byly výsledky relativně příznivé. Explorační úloha T1 nebyla hodnocena binárně jako správně nebo chybně vyřešená, protože jejím cílem bylo sledovat přirozené seznámení participantů s aplikací. U dalších úloh již bylo možné posuzovat plné, částečné nebo neúspěšné dokončení. Nejvyšší míra plného splnění byla zjištěna u úlohy T2, v níž měli participanti najít vizualizaci *Point Cloud* a zjistit nejvyšší hodnotu teploty; tuto úlohu plně splnilo **87,0 %** participantů. Úloha T3, zaměřená na přepnutí na vizualizaci *3D Graduated Symbols* a úpravu tvaru a průměru znaků, byla plně splněna 46 participanty, tedy **85,2 %**, částečně ji splnilo šest participantů, tedy 11,1 %, a nesplnili ji dva participanti, tedy 3,7 %. Nejnižší úspěšnost vykazala úloha T4 navázaná na metodu *Voxels*, kde bylo potřeba zjistit rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou teploty. Tuto úlohu plně vyřešilo 42 participantů, tedy **77,8 %**, částečně ji vyřešilo šest participantů, tedy 11,1 %, a dalších šest participantů ji nevyřešilo. Úloha T5, která měla subjektivně-preferenční charakter a vyžadovala výběr nejlíbivější vizualizace a úpravu barevného schématu, byla plně dokončena 46 participanty, tedy **85,2 %**, částečně sedmi participanty, tedy 13,0 %, a u jednoho participanta nebyl výsledek vyhodnotitelný.

Tyto výsledky ukazují to, že nejproblematictější nebyly úlohy vyžadující pouze nalezení určité metody nebo provedení konkrétního nastavení, ale úlohy kombinující práci s 3D scénou, interpretaci hodnot a kognitivní zpracování výsledku. Úloha T4 byla v tomto ohledu nejvýraznějším příkladem. Participanti museli najít metodu *Voxels*, porozumět zobrazení hodnot pomocí 3D bloků, identifikovat minimum a maximum a následně vypočítat rozdíl. Nešlo tedy pouze o interakční ovládání aplikace, ale o složený analytický proces. U části participantů se navíc projevilo čekání na vykreslení voxelové vizualizace, opakované klikání do mapového pole nebo nejistota, zda se vizualizace načítá, nebo zda je třeba provést další akci.

Právě zde se ukázalo, že technická odezva aplikace a interpretační náročnost 3D reprezentace se mohou vzájemně zesilovat.

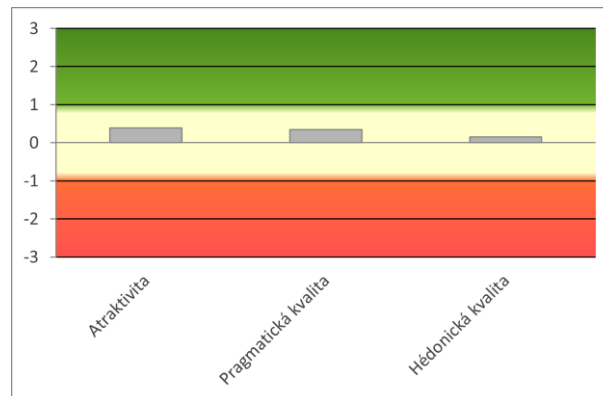
Důležitý obraz o subjektivním hodnocení aplikace poskytl **dotazník UEQ**. Do analýzy bylo zahrnuto všech 54 participantů a všech 26 položek bylo transformováno podle standardní metodiky UEQ do intervalu -3 až $+3$. Výsledky na úrovni šesti škál ukázaly, že všechny dimenze zůstaly v neutrálním pásmu $-0,8$ až $+0,8$, avšak s mírným posunem do kladných hodnot (**Obrázek 90**). **Nejvyšší** průměr vykazala škála *Přehlednost* ($M = 0,514$; $Var = 2,26$), následovaná škálami *Spolehlivost* ($M = 0,472$; $Var = 1,16$), *Atraktivita* ($M = 0,392$; $Var = 1,70$) a *Originalita* ($M = 0,301$). Naopak **nejnižší** hodnoty měly škály *Účinnost* ($M = 0,046$; $Var = 1,29$) a *Stimulace* ($M = 0,005$; $Var = 1,67$). To znamená, že aplikace nebyla participanty hodnocena vyloženě negativně, ale současně nebyla vnímána jako jednoznačně efektivní, rychlá nebo výrazně stimulující.



Obrázek 90: Průměrné hodnoty všech šesti škál.

Obrázek 90 je vhodné interpretovat jako základní profil uživatelského prožitku aplikace 3D-Geo-Vis. Relativně nejlépe hodnocená *Přehlednost* naznačuje, že se participanté dokázali v aplikaci po určitém čase zorientovat a naučit se její základní principy. Poměrně příznivá hodnota *Spolehlivost* ukazuje, že aplikace nepůsobila zcela nepředvídatelně, což je důležité zejména u 3D prostředí, kde může kombinace rotace, zoomu a proměnlivých vizualizačních metod snadno vést ke ztrátě kontroly. Nízká hodnota *Účinnost* však současně ukazuje, že práce s aplikací nebyla vnímána jako dostatečně rychlá nebo plynulá. Tato interpretace odpovídá jak pozorování během testování, tak otevřeným odpovědím participantů.

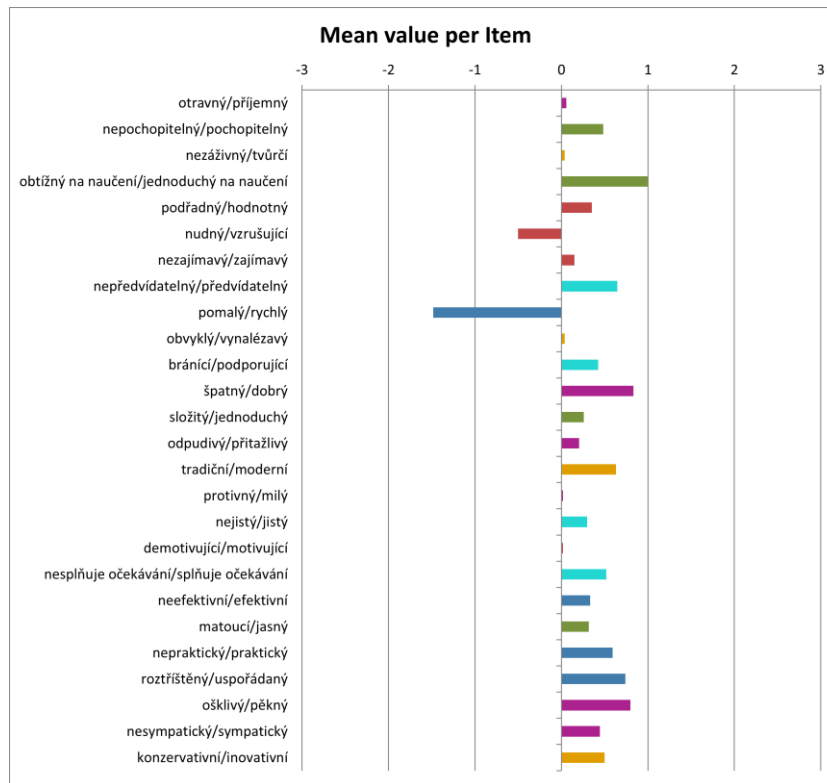
Na úrovni meta-dimenzí UEQ byla **pragmatická kvalita**, tvořená škálami *Přehlednost*, *Účinnost* a *Spolehlivost*, hodnocena **mírně výše** než **hédonická kvalita**, tvořená škálami *Stimulace* a *Originalita*. Pragmatická kvalita dosáhla hodnoty $M = 0,34$, zatímco hédonická kvalita $M = 0,15$. Atraktivita jako samostatná celková valenční dimenze dosáhla $M = 0,392$. Ani jedna z těchto hodnot tedy nepřekročila hranici jednoznačně pozitivního hodnocení, ale všechny se pohybovaly v mírně kladné části neutrálního pásma (**Obrázek 91**).



Obrázek 91: Průměrné hodnoty z hlediska atraktivity, pragmatické a hédonické kvality.

Obrázek 91 dokládá, že uživatelská zkušenost s aplikací byla spíše racionálně akceptovatelná než výrazně pozitivně prožitková. Jinými slovy, participant aplikaci do určité míry chápali jako použitelný nástroj pro práci s 3D tematickými vizualizacemi, ale samotná interakce pro ně nebyla výrazně plynulá, zábavná nebo motivační. Tento rozdíl je také důležitý pro návrh vylepšení, protože neukazuje pouze na potřebu opravit jednotlivé chyby, ale také na potřebu zlepšit celkovou plynulost práce, zpětnou vazbu systému a pocit kontroly nad aplikací.

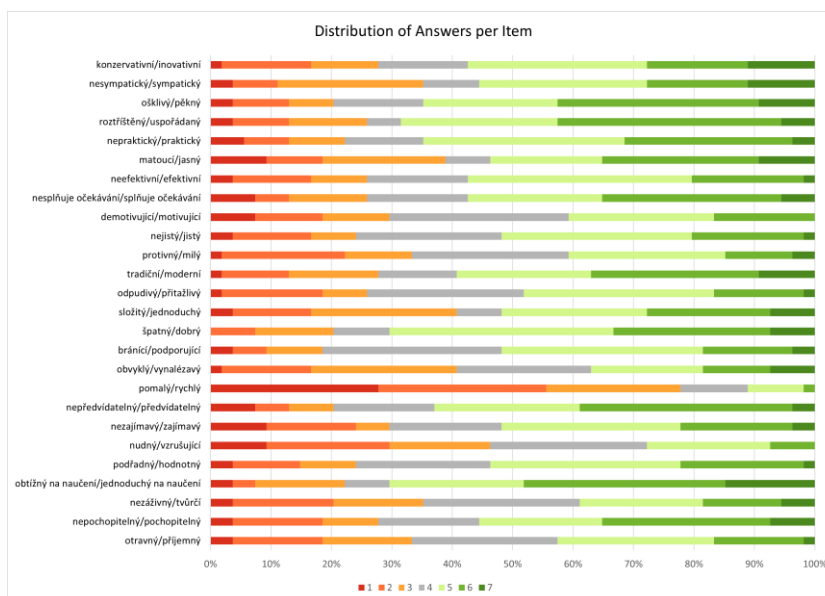
Detailnější pohled na jednotlivé položky UEQ (**Obrázek 92**) ukázal, že celkový neutrální profil nevznikl rovnoměrně napříč všemi položkami. Některé aspekty byly hodnoceny relativně dobře, jiné naopak výrazně snižovaly celkové hodnocení. **Nejpříznivější položkou** byla snadnost **naučení** se práce s aplikací, která dosáhla $M = 1,0$ a jako jediná zřetelně překročila hranici pozitivního hodnocení. Poměrně vysoko byly hodnoceny také položky spojené s celkovým dojmem a estetikou, například dvojice *dobrý–špatný* a *pěkný–ošklivý*, obě s hodnotou $M = 0,8$, a dále *uspořádaný–roztříštěný* s hodnotou $M = 0,7$. Naopak nejvýrazněji negativním signálem byla položka *rychlý–pomalý*, která dosáhla přibližně $M = -1,5$. Právě tato položka výrazně snižovala celkovou škálu *Účinnost*, ačkoliv ostatní položky této škály nebyly tak negativní.



Obrázek 92: Průměrné hodnoty všech 26 položek.

Obrázek 92 je proto vhodné chápat jako důkaz, že hlavní problém nebyl v úplné nesrozumitelnosti aplikace nebo v celkové neatraktivitě rozhraní, ale především v rychlosti, plynulosti a některých konkrétních prvcích interakce. Aplikace byla vnímána jako poměrně naučitelná a vizuálně přijatelná, ale ne jako dostatečně rychlá. Z hlediska návrhu to znamená, že vylepšení neměla směřovat pouze k přepracování vizuálního stylu, ale především k výkonové optimalizaci, jasnějšímu vedení uživatele a snížení počtu situací, kdy uživatel neví, zda systém reaguje.

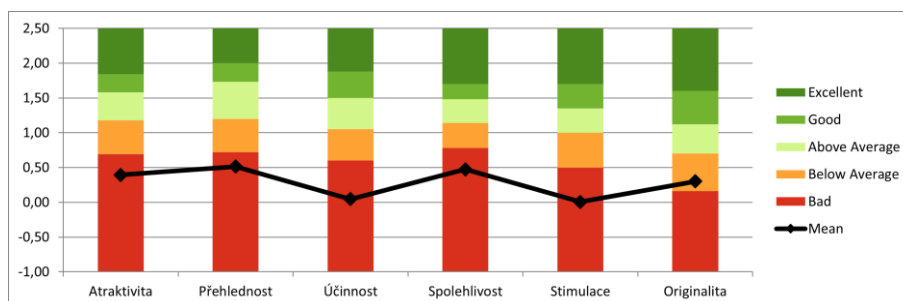
Rozdělení odpovědí po jednotlivých položkách (**Obrázek 93**) dále ukázalo, že některé položky byly mezi participanty hodnoceny **velmi rozdílně**. Nejvyšší variabilitu vykazala položka *jasný-matoucí* (Var = 3,4; SD = 1,9), což ukazuje, že část participantů aplikaci vnímala jako srozumitelnou, zatímco jiní se v ní ztráceli. Tento výsledek dobře odpovídá i kvalitativní inspekci eye-tracking záznamů, kde byly patrné značné individuální rozdíly v tom, zda participant rychle objevil přepínání metod, zda pracoval s pravým panelem cíleně, nebo zda se při interakci s 3D scénou pohyboval spíše pokusně.



Obrázek 93: Rozdělení odpovědí po jednotlivých položkách.

Obrázek 93 tak doplňuje průměrné hodnoty o informaci, že aplikace nepůsobila na všechny participanty stejně. U některých uživatelů se pravděpodobně rychle vytvořil funkční mentální model prostředí, zatímco jiní zůstávali déle ve fázi orientace. Tento rozdíl je důležitý zejména u aplikací pro 3D geovizualizaci, kde jsou uživatelé vystaveni nejen klasickému webovému rozhraní, ale také méně běžné práci s virtuálním glóblem, perspektivou, výškou objektů a proměnlivým znakovým klíčem.

Benchmarkové srovnání UEQ vůči referenční databázi ukázalo nepříznivější obraz než samotné absolutní průměry. Referenční databáze UEQ zahrnuje 21 175 respondentů ve 468 studiích napříč různými typy digitálních produktů. V tomto srovnání spadlo pět škál aplikace 3D-Geo-Vis do kategorie **Bad**: *Atraktivita*, *Přehlednost*, *Účinnost*, *Spolehlivost* a *Stimulace*. Pouze *Originalita* byla zařazena do kategorie *Below Average*. To znamená, že i mírně pozitivní absolutní hodnoty byly ve srovnání s širší databází digitálních produktů relativně nízké.



Obrázek 94: Průměrné hodnoty všech šesti škál vůči referenční databázi UEQ.

Obrázek 94 je však nutné interpretovat opatrně, protože referenční databáze UEQ není specifická pro interaktivní 3D kartografické aplikace. Srovnává tedy aplikaci 3D-Geo-Vis s širokým spektrem digitálních systémů, včetně produktů, které mohou být jednodušší,

rychlejší a uživatelsky vyzrálejší. Přesto je tento výsledek důležitý, protože potvrzuje, že z hlediska obecného uživatelského prožitku měla testovaná prototypová verze aplikace značný prostor ke zlepšení. Nešlo tedy pouze o několik izolovaných problémů v jednotlivých úlohách, ale o širší potřebu zvýšit plynulost, přehlednost a předvídatelnost práce.

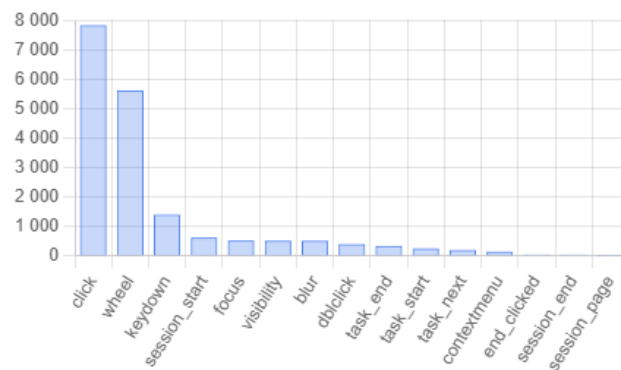
Interakční logy získané pomocí nástroje **MapLogger** poskytly druhou klíčovou vrstvu výsledků. Celkem bylo za všech 54 participantů získáno 54 CSV souborů, vždy jeden soubor na participanta. Po vyloučení meta událostí bylo zaznamenáno **15 457 interakcí (Obrázek 95)**, zahrnujících kliknutí myši, použití kolečka myši, klávesové vstupy, dvojklik nebo vyvolání kontextového menu. Pokud byly započítány i meta události, například začátek a konec testování, načtení stránky nebo změny stavu experimentu, celkový počet řádků v CSV souborech dosáhl 18 642. Průměrný počet interakcí na participanta byl 286, mediánová délka experimentu činila 11,5 minuty a průměrná intenzita interakcí dosáhla 24,3 interakcí za minutu. Mezikvartilové rozpětí počtu interakcí bylo 180–326, přičemž minimum bylo 75 a maximum 745 interakcí na participanta.

Participants 54 One CSV file per participant	Interactions (sum) 15,457 Excludes session/task markers and page/focus/blur/resize	Interactions (mean) 286 Per participant	Session duration (median) 11.5 min Based on the most relevant contiguous session segment
Interactions/min (mean) 24.3 Per participant	Rows (sum) 18,642 All events including meta	Interactions (IQR) 180–326 25th–75th percentile	Interactions (min-max) 75.0–745 Across participants

Obrázek 95: Přehled o počtech interakcí z nástroje MapLogger Analyser.

Tento přehled ukázal vysokou variabilitu v uživatelských strategiích. Někteří participanté zvládli experiment s relativně nízkým počtem interakcí, což mohlo znamenat efektivní a přímočarou práci, ale také méně důkladnou exploraci. Naopak velmi vysoké počty interakcí mohly odrážet intenzivní zkoumání prostředí, ale také nejistotu, opakované pokusy, technické čekání nebo méně efektivní strategii. Z hlediska použitelnosti je důležité, že samotný počet interakcí nelze interpretovat jednoznačně. Vysoká interakční aktivita není automaticky negativní, pokud odpovídá cílené exploraci; problematická je tehdy, pokud je spojena s váháním, opakovanými neúspěšnými pokusy nebo ztrátou orientace.

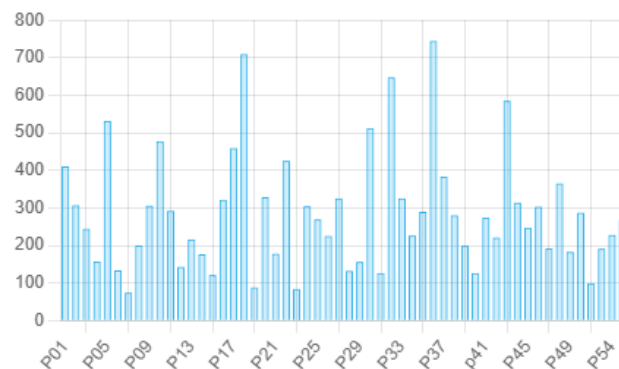
Z hlediska **typů interakcí** dominovalo **kliknutí myši (Obrázek 96)**, kterých bylo zaznamenáno 7 841. Druhou nejčastější interakcí bylo **použití kolečka myši**, které se objevilo 5 628× a sloužilo především k přibližování a oddalování v mapovém prostředí. Třetí nejčastější kategorií byly **klávesové vstupy** s počtem 1 414. Ostatní typy interakcí byly zastoupeny výrazně méně. V podrobnějším rozboru bylo patrné, že uživatelé pracovali převážně standardními vstupy: dominovalo levé tlačítko myši, zatímco pravé tlačítko bylo používáno jen okrajově. U kolečka myši převažovalo oddalování nad přibližováním, což lze interpretovat jako snahu participantů znovu získat přehled po přílišném přiblížení nebo po ztrátě prostorového kontextu.



Obrázek 96: Použité typy interakcí z nástroje MapLogger Analyser.

Obrázek 96 potvrzuje, že práce s aplikací byla výrazně **založena na interakci pomocí myši**. To odpovídá charakteru 3D webové mapové aplikace na stolním počítači, ale současně to ukazuje, že kvalita práce s myší, odezva na kliknutí, zoomování a rotaci scény mají pro výslednou použitelnost zásadní význam. Vysoký počet interakcí kolečkem je důležitý také proto, že v kvalitativní inspekci bylo opakovaně pozorováno přílišné přibližování až na úroveň obcí, přestože to nebylo hlavním smyslem aplikace. Tento výsledek tak podporuje doporučení omezit rozsah přiblížení nebo alespoň zavést takové vodící prvky, které pomohou udržet uživatele v relevantním měřítku.

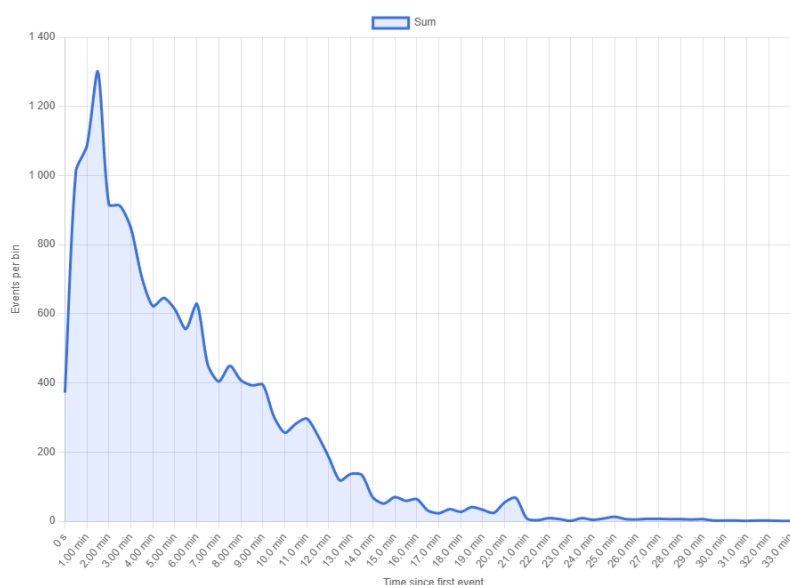
Rozložení celkového počtu interakcí podle participantů (**Obrázek 97**) dále ukázalo výrazné individuální rozdíly. Většina participantů se pohybovala přibližně v rozsahu 200–350 interakcí, ale několik participantů, například P18, P32 a P36, překročilo hranici 600 interakcí. Takové případy naznačují odlišné strategie práce, které mohly souviset s intenzivní explorační, opakovaným testováním ovládacích prvků, nižší jistotou nebo technickými prodlevami. Na opačné straně se objevili participanté s velmi nízkým počtem interakcí pod 150, což může odpovídat efektivnímu postupu, ale také menšímu zapojení do explorační.



Obrázek 97: Celkový počet interakcí za každého participanta.

Obrázek 97 je podstatný proto, že ukazuje heterogenitu uživatelského chování, kterou by samotná průměrná hodnota zakryla. Z hlediska metodologického přínosu PS5 je právě tento výsledek jedním z argumentů pro logování interakcí: eye-tracking záznam ukáže, kam se participant díval, ale MapLogger umožní kvantifikovat, jak intenzivně a jakým způsobem do prostředí zasahoval. Teprve kombinace obou vrstev umožňuje rozlišit například uživatele, který dlouho vizuálně analyzuje scénu bez mnoha interakcí, od uživatele, který stejnou dobu tráví opakovanými neúspěšnými pokusy.

Časový průběh interakcí (Obrázek 98) ukázal, že interakční aktivita byla koncentrována zejména v úvodních minutách experimentu. V agregovaných třicetisekundových intervalech dosahovala maxima přibližně 1 000–1 300 interakcí, zatímco typičtější úseky se pohybovaly výrazně níže. Tento vzorec odpovídá úvodní „warm-up“ fázi, v níž participant zkoumali rozhraní, testovali zoomování, rotaci, práci s pravým panelem a snažili se pochopit, jak aplikace funguje.

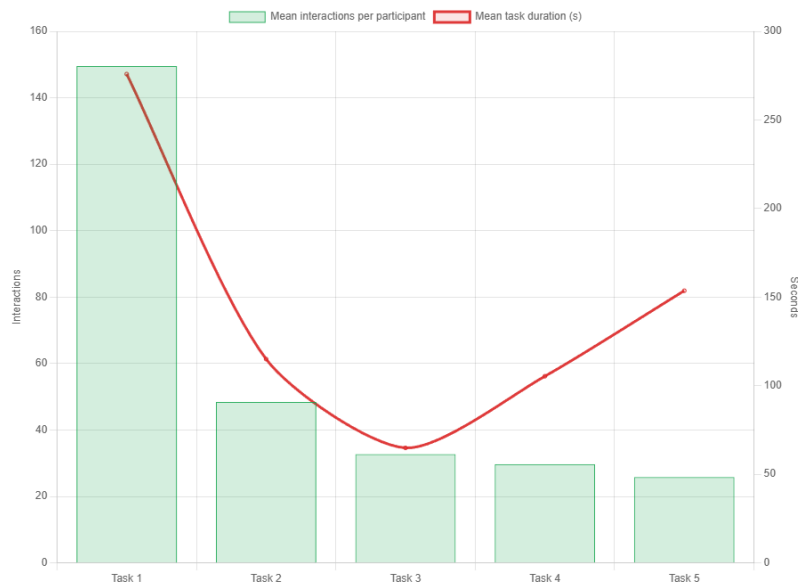


Obrázek 98: Interakce v průběhu času.

Obrázek 98 je důkazem, že první kontakt s aplikací byl pro participanty interakčně nejintenzivnější. To je důležité pro návrh úvodního vedení uživatele. Pokud je největší objem interakcí soustředěn do fáze, kdy uživatel ještě nemá vytvořený stabilní mentální model aplikace, je vhodné tuto fázi podpořit nápovědou, „onboardingem“, jasnějším zvýrazněním klíčových ovládacích prvků a případně krátkým průvodcem, který ukáže rozdíl mezi přepínáním vizualizačních metod, změnou podkladové mapy a úpravou parametrů kartografických znaků.

Analýza interakcí a trvání jednotlivých úloh (Obrázek 99) ukázala, že různé úlohy vyvolávaly odlišné formy zátěže. Úloha T1 měla vysokou interakční aktivitu, protože participant volně zkoumali aplikaci. Úloha T2 byla cílenější a více procedurální, protože vyžadovala nalezení metody *Point Cloud* a zjištění nejvyšší hodnoty. Úloha T3 měla manipulativní charakter a dosahovala relativně nízkých hodnot času i počtu interakcí, protože po pochopení principu pravého panelu šlo o poměrně jednoznačný postup. Naopak úloha T4

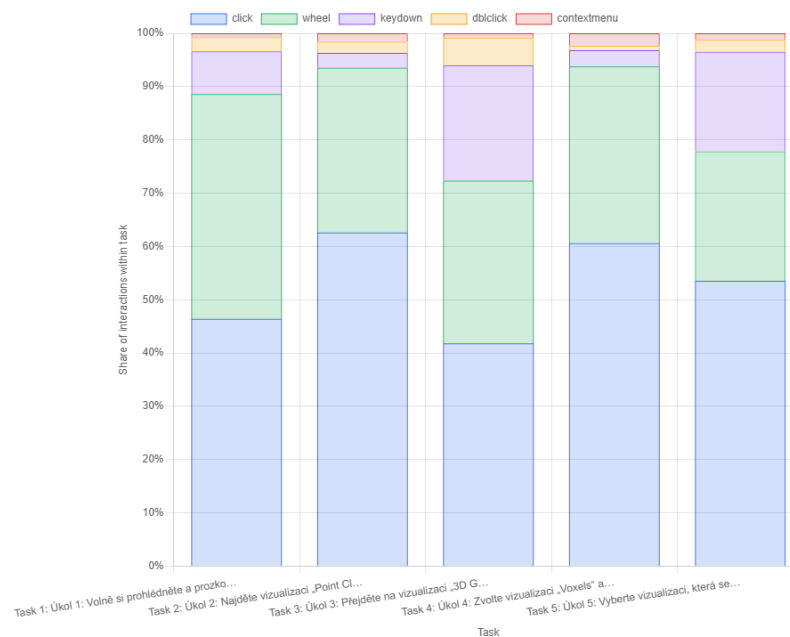
vykazovala delší dobu řešení při relativně nižším počtu interakcí, což ukazuje, že její náročnost byla více kognitivní než interakční. Úloha T5 měla rovněž delší průběh, protože participanti porovnávali více vizualizačních metod a esteticky doladovali barevné schéma.



Obrázek 99: Interakce a trvání jednotlivých úloh.

Obrázek 99 podporuje důležité metodologické zjištění, že **čas řešení a počet interakcí** musí být interpretovány **společně**. Delší čas nemusí nutně znamenat horší ovladatelnost, protože může odrážet analytické nebo estetické rozhodování. Naopak vysoký počet interakcí nemusí být sám o sobě znakem problému, pokud jde o přirozenou exploraci. Problematické jsou zejména kombinace dlouhého času, vysokého počtu interakcí a opakovaného váhání v eye-tracking záznamu. Právě tyto kombinace nejlépe signalizují možné bariéry použitelnosti.

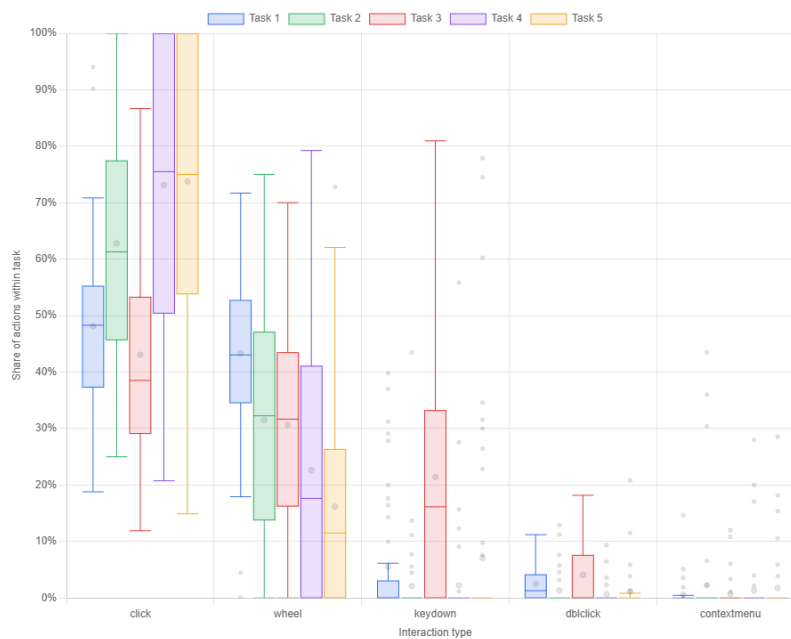
Interakční profily (Obrázek 100) podle úloh ukázaly, že základní způsob ovládání byl napříč úlohami relativně stabilní, ale měnil se poměr jednotlivých typů interakcí. U úlohy T1 byl patrný větší podíl kliknutí a kolečka myši, což odpovídalo volné exploraci. U úlohy T3 se zvýšil relativní význam klávesových vstupů, protože participanti upravovali parametry znaků. U úlohy T4 dominovalo spíše klikání a vizuální inspekce, zatímco u T5 se znovu objevila variabilnější strategie spojená s porovnáváním metod a úpravou vzhledu.



Obrázek 100: Interakční profily specifické pro danou úlohu (proporcionálně).

Obrázek 100 je důkazem, že MapLogger dokázal zachytit rozdíly mezi typy úloh, a to i bez nutnosti ručního kódování celého záznamu. Úlohy se nelišily pouze tím, jak dlouho trvaly, ale také tím, jaké vstupy uživatelé využívali. To je také podstatné pro metodologii hodnocení IKV, protože různé typy úloh mohou vyžadovat jiné analytické metriky. U analytické úlohy je důležitější čas a vizuální inspekce, u manipulační úlohy počet a typ změn parametrů, u explorativní úlohy šíře a posloupnost použitých funkcí.

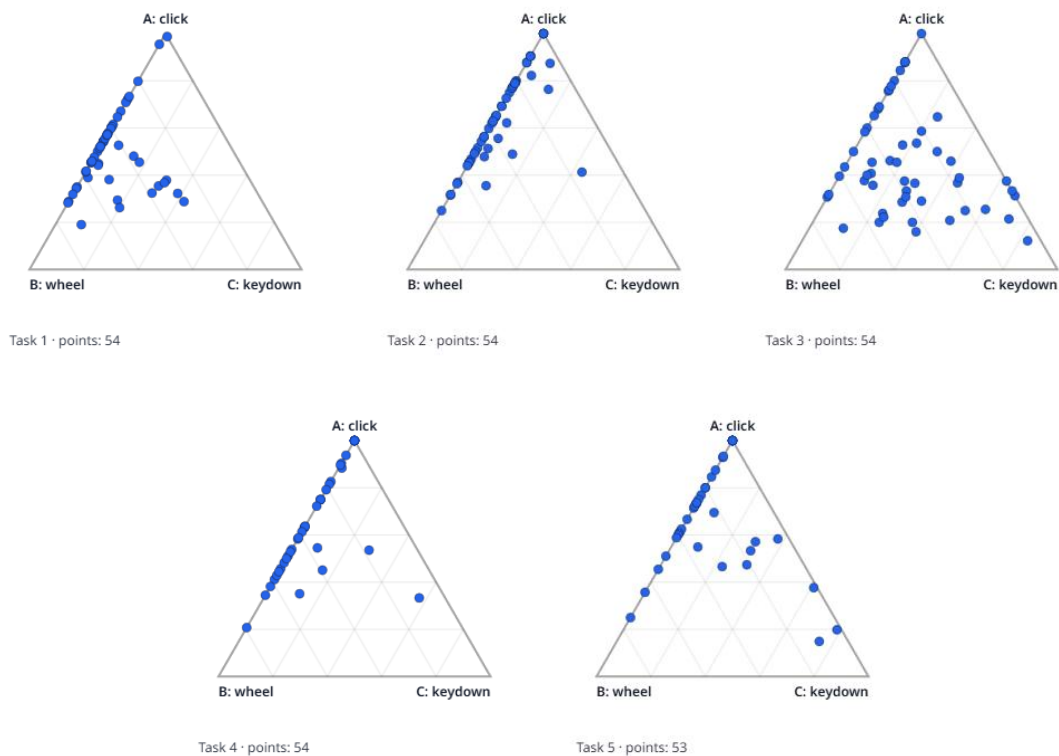
Boxploty podílů typů interakcí podle úloh (Obrázek 101) dále ukázaly variabilitu mezi účastníky. Zatímco u některých úloh byl profil interakcí relativně kompaktní, u jiných se objevovaly výraznější odchylky. To opět potvrzuje, že uživatelé nepostupovali jednotně. Někteří preferovali přímý postup s minimem interakcí, jiní prostředí zkoumali intenzivněji a někteří se dostávali do opakovaných pokusů při práci s rozhraním.



Obrázek 101: Podíl typů interakcí podle úloh (boxploty).

Obrázek 101 potvrzuje argument, že i v kontrolovaném laboratorním experimentu s fixním pořadím úloh vznikají různé interakční strategie. Z hlediska návrhu aplikace z toho vyplývá, že rozhraní by nemělo být optimalizováno pouze pro ideálního „přímého“ uživatele, ale mělo by pomoci i těm uživatelům, kteří nejprve zkoumají, vracejí se k instrukcím, opakovaně testují ovládací prvky nebo se při práci s 3D scénou ztratí.

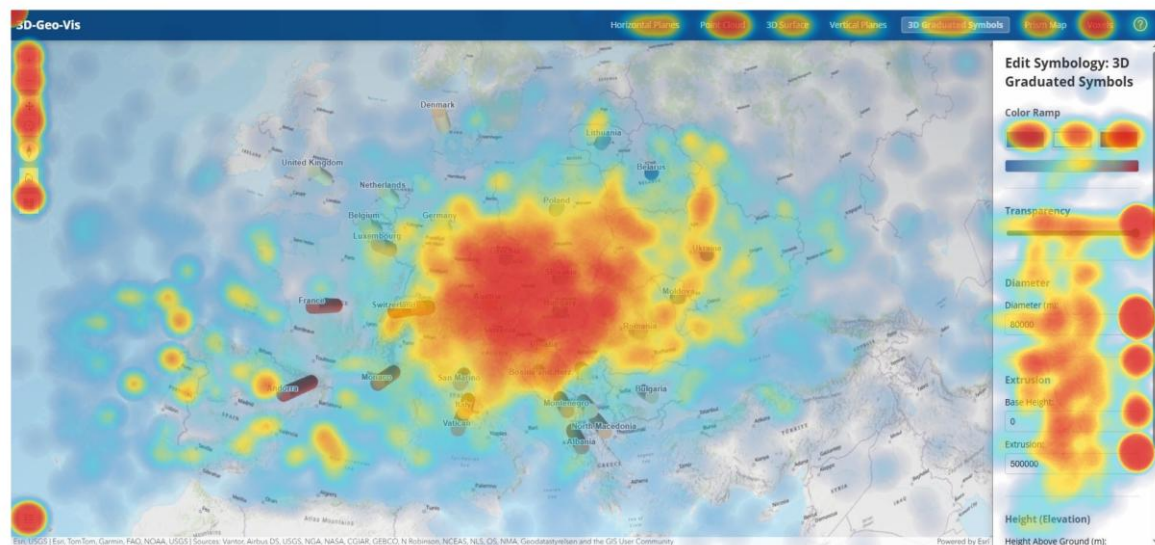
Ternární diagramy se třemi dominantními typy interakcí (**Obrázek 102**) ukázaly podobný obraz. Úloha T1 byla rozptýlenější podél osy *click–wheel*, což odpovídá rozdílným způsobům volné explorační. Úloha T2 byla kompaktnější a posunutá blíže ke kliknutí, což indikuje jednodušší procedurální postup. U úlohy T3 byl patrný větší rozptyl směrem ke klávesovým vstupům, protože úloha vyžadovala úpravu parametrů. Úloha T4 se koncentrovala převážně na kliknutí a méně na další vstupy, což odpovídá spíše vizuálně-analytické povaze řešení. Úloha T5 měla opět rozptýlenější charakter, protože umožňovala individuální experimentování s podobou vizualizace.



Obrázek 102: Ternární diagramy se třemi dominantními typy interakcí pro každou úlohu.

Obrázek 102 dobře ukazuje, že odlišnost úloh se neprojevovala jen v absolutním počtu akcí, ale i v relativní skladbě interakcí. Pro další využití nástroje MapLogger je tento výstup důležitý v tom, že ternární diagramy umožňují rychle identifikovat, zda je určitá úloha více navigační, manipulační, nebo vizuálně-analytická. V kontextu PS5 se potvrdilo, že interakční logy mohou významně doplnit eye-tracking, protože pomáhají objektivizovat chování, které by jinak bylo nutné pracně interpretovat pouze z videozáznamu.

Agregovaná heatmapa interakcí byla vytvořena z 12 762 interakčních bodů při rozlišení 1920×896 px. Ukázala tři hlavní oblasti koncentrace interakcí: horní navigační lištu s přepínači vizualizačních metod, pravý postranní panel s parametry mapových znaků a samotné mapové pole. Tento výsledek odpovídá očekávané struktuře aplikace, ale zároveň potvrzuje, že pravý panel přitahoval značnou část uživatelské aktivity (**Obrázek 103**).



Obrázek 103: Heatmapa s agregovanými interakcemi ve statickém obrázku.

Obrázek 103 je však vhodné interpretovat společně s eye-tracking záznamy. Ty ukazovaly, že pozornost participantů byla silně soustředěna na mapové okno a pravý panel, zatímco přepínání mezi vizualizačními metodami v horní části rozhraní nebylo v úvodní fázi dostatečně nápadné. Heatmapa interakcí zároveň naznačuje fakt, že horní lišta s metodami se stala významně využívanou zejména v úlohách, které přepnutí metody explicitně vyžadovaly. To znamená, že problém nebyl v tom, že by funkce neexistovala nebo byla technicky nefunkční, ale v její objavitelnosti bez přímého úkolového vedení.

Dále **kvalitativní inspekce eye-tracking záznamů** ukázala několik opakujících se vzorců. V první explorační úloze se část participantů skutečně snažila projít různé části aplikace a testovat dostupné funkce, ale mnoho participantů interagovalo pouze s několika prvky a často si vůbec neprohlédlo další dostupné metody vizualizace. Tohle je důležité zjištění, protože aplikace byla postavena právě na porovnání sedmi metod 3D geovizualizace. Pokud uživatel během volné explorace nepřepne na jinou metodu, znamená to, že jedna z klíčových funkcí aplikace nebyla dostatečně výrazná. V dalších úlohách byli participanti k přepnutí metod donuceni zadáním, ale to již neodpovídalo přirozenému objevení funkce.

Druhé zásadní zjištění se týkalo **strategie čtení hodnot ve 3D prostředí**. Z hlediska principu 3D vizualizace by bylo vhodné pracovat s náklonem scény, tedy posuzovat výšku nebo prostorové uspořádání hodnot také z bočního pohledu a barevné značení využívat jako orientační podporu. Ve skutečnosti však velká část participantů postupovala podobně jako u 2D mapy, tedy dívali se na scénu shora, klikali do mapy nebo se snažili hodnoty odvodit přímo z legendy. V některých případech tak participanti dospěli k odpovědi bez skutečné prostorové analýzy 3D reprezentace. Toto zjištění je právě metodologicky podstatné v tom, že ukazuje, že samotné vytvoření 3D vizualizace neznamená, že uživatelé budou automaticky využívat 3D strategii interpretace.

Třetí oblast problémů souvisela s **nejasným rozlišením mezi podkladovými mapami a tematickými vizualizačními metodami**. Někteří participanti při hledání metody *Point Cloud* procházeli seznam podkladových map, případně u něj zůstávali neúměrně dlouho,

přestože výběr podkladové mapy nebyl hlavním účelem aplikace. Rozsáhlý seznam podkladových map tak odváděl pozornost od klíčové funkcionality. Z toho vyplývá doporučení buď seznam podkladových map zjednodušit, skrýt do méně dominantní nabídky, nebo lépe vizuálně oddělit „*basemap*“ od tematických metod 3D geovizualizace.

Čtvrtý okruh se týkal **parametrů v pravém panelu**. U úlohy T3 se projevila jazyková a sémantická bariéra u parametru „*diameter*“. Část participantů nechápala, že jde o průměr či velikost znaků, a upravovala jiný parametr. V některých případech mohli participanti spojovat pojem *diameter* s jinou částí vizualizace nebo si nebyli jisti, k čemu přesně se vztahuje. To vede k jednoznačnému doporučení lokalizovat názvy parametrů, doplnit vysvětlivky nebo tooltipy a případně názvy formulovat jednoznačněji, například jako „průměr znaku“ nebo „velikost bodu/sloupce“ podle konkrétní metody.

Pátý problém představovala **práce s hodnotami parametrů**. Během testování bylo opakovaně pozorováno, že participanti zadávali i nesmyslné nebo extrémní hodnoty, které sice aplikace technicky umožňovala, ale z hlediska smysluplné vizualizace nebyly vhodné. To ukazuje na potřebu zavést doporučené rozsahy, validaci vstupů nebo alespoň výchozí a doporučené hodnoty přímo v rozhraní. Uživatel by neměl mít možnost snadno vytvořit vizualizaci, která je kartograficky nebo interpretačně prakticky nepoužitelná, aniž by ho systém upozornil.

Šestý problém se týkal **prostorové orientace**. Mnoho participantů se přibližovalo příliš detailně, často až na úroveň obcí, což nebylo pro účel aplikace vhodné. Někteří participanti navíc výrazně rotovali glóblem a dostávali se do pohledů, kde nebyla vizualizace dobře čitelná nebo kde ztráceli prostorový kontext. Z hlediska návrhu aplikace je proto vhodné zvážit omezení minimálního a maximálního měřítka, zavedení prostorových limitů pohybu, zřetelnější tlačítko návratu do výchozího pohledu nebo mechanismus, který uživatele snadno vrátí k relevantnímu rozsahu dat.

Sedmý problém byl úzce spojen s **výkonem aplikace**, zejména u metody **Voxels**. Tato vizualizace se načítala a vykreslovala nejdéle a doba načítání byla mezi participanty proměnlivá. V eye-tracking záznamech se to projevilo čekáním, fixacemi na mapové pole, skenováním rozhraní a opakovanými pokusy o interakci. V otevřených odpovědích se rychlost a plynulost objevovaly jako dominantní téma: z 35 participantů, kteří poskytli komentář k vylepšení, jich 25, tedy **71,4 %**, výslovně zmínilo rychlost, odezvu nebo grafický výkon. Tento výsledek tak jednoznačně potvrzuje, že výkon nebyl pouze technickým detailem, ale přímo ovlivňoval vnímanou použitelnost aplikace.

Osmý okruh se týkal **úpravy barevného schématu**. Někteří participanti při výběru barev viděli změny přímo v mapě, ale následně zavřeli dialog křížkem v domnění, že se změna aplikuje. Aplikace však vyžadovala potvrzení tlačítkem „OK“. Tento drobný prvek rozhraní vytvářel zbytečnou nejistotu a mohl vést jen k částečnému splnění úlohy T5. Doporučením je zde zavést jednoznačnější mechanismus potvrzení, případně průběžné aplikování změn bez nutnosti potvrzení, jasné oddělení tlačítek „Použít“, „OK“ a „Zrušit“ nebo explicitní zpětnou vazbu, že změna byla provedena.

Z hlediska subjektivních preferencí se **neukázal jeden dominantně preferovaný typ vizualizace**. V úloze T5 byly nejčastěji voleny tři metody: *Point Cloud*, *Voxels* a *Horizontal Planes*, každá shodně u 10 participantů, tedy **18,5 %**. Následovaly *Prism Map* se sedmi volbami (13,0 %), *3D Surface* se šesti volbami (11,1 %) a *3D Graduated Symbols* a *Vertical Planes* shodně

s pěti volbami (9,3 %). Jeden participant volbu nedokončil. Participantů tedy nepreferovali jednu univerzální metodu, ale oceňovali možnost volby a variabilitu zobrazení. Zároveň je zajímavé, že *Voxels* patřily mezi nejčastěji preferované metody, přestože úloha navázaná na *Voxels* vykazovala nejnižší úspěšnost. To také naznačuje rozdíl mezi vizuální atraktivitou reprezentace a její analytickou efektivitou.

Z metodologického hlediska se jako velmi přínosné ukázalo **využití nástroje MapLogger**. Nástroj technicky spolehlivě zajistil sekvenci úloh, zobrazení zadání ve vrchní liště a stažení CSV souboru po dokončení testování. Horní lišta se zadáním byla během testování zjevně užitečná, protože **se k ní participantů opakovaně vraceli** a ujišťovali se o zadání. Je pravděpodobné, že pokud by zadání museli držet pouze v paměti, byla by úspěšnost některých úloh nižší. MapLogger tedy nesloužil pouze jako pasivní logger, ale zároveň jako nástroj pro standardizované řízení experimentu.

Současně se však ukázal i **limit** nástroje MapLogger v použité podobě. Pro detailnější analýzu chyběly přímo využitelné **logované URL adresy**, respektive sekvence URL nebo stavů aplikace v podobě, která by umožnila jednoduše vyhodnotit, která stránka či metoda byla participanty zobrazována nejdéle, v jakém pořadí jednotlivé metody navštěvovali, kolikrát se k nim vraceli a jaké metody byly během volné explorační zcela ignorovány. Pokud by byla tato URL nebo stavová data dostupná ve strukturované podobě, bylo by možné doplnit analýzu o velmi důležité metriky, např. dobu zobrazení každé vizualizační metody, pořadí navštívených metod, četnost návratů, přechody mezi metodami a vazbu těchto přechodů na úspěšnost nebo preference. Pro budoucí verzi nástroje MapLogger je proto vhodné dále uvažovat o explicitním logování URL, názvu aktuální metody nebo širšího aplikačního stavu.

Na základě triangulace všech dat lze formulovat **několik hlavních návrhů** na vylepšení aplikace. Prvním a nejdůležitějším návrhem bylo **zvýšit objevitelnost přepínání mezi metodami** vizualizace. Přepínač metod byl v prototypu umístěn v horní části rozhraní, ale v úvodní fázi nebyl pro mnoho participantů dostatečně dominantní. Uživatelé se soustředili především na mapové pole a pravý panel, zatímco nabídka metod zůstávala mimo jejich primární pozornost. Vylepšení by mělo směřovat k výraznější vizuální hierarchii, lepšímu seskupení funkcí a ideálně k integraci všech metod do jednotného rozhraní, aby uživatel nemusel chápat každou metodu jako samostatnou podstránku.

Druhým návrhem bylo **přepracovat strukturu rozhraní** tak, aby bylo jasné, co je podkladová mapa, co je tematická vizualizační metoda a co jsou parametry znaku. V původní aplikaci mohlo docházet k tomu, že uživatelé hledali tematickou metodu v nabídce podkladových map, což ukazuje na ne zcela srozumitelnou konceptuální organizaci rozhraní. Z pohledu použitelnosti je vhodné tyto kategorie důsledně oddělit, pojmenovat a vizuálně uspořádat tak, aby odpovídaly mentálnímu modelu uživatele.

Třetím návrhem bylo **zlepšit výkon a odezvu aplikace**, zejména u náročnějších metod, jako jsou *Voxels*. Výkonové limity se promítaly do UEQ, otevřených odpovědí, eye-tracking záznamů i interakčních logů. Vylepšení by měla zahrnovat optimalizaci vykreslování, progresivní načítání, jasnou indikaci probíhajícího načítání a případně možnost snížit hustotu voxelů nebo velikost datového objemu. Uživatel by měl vždy vědět, zda aplikace pracuje, zda čeká na načtení, nebo zda je třeba provést další akci.

Čtvrtým návrhem bylo doplnit **srozumitelnější názvy parametrů, nápovědu** a kontextové **vysvětlivky**. Parametry jako *diameter* by měly být lokalizovány nebo vysvětleny tak, aby

uživatel jednoznačně chápal, který vizuální aspekt ovlivňuje. U parametrů by měly být uvedeny doporučené hodnoty, případně by měly být omezeny na smysluplné rozsahy. To by omezilo zadávání extrémních hodnot a snížilo množství pokusů a omylů.

Pátým návrhem bylo **zlepšit zpětnou vazbu systému při úpravách barev** a dalších vizuálních parametrů. Pokud uživatel provede změnu, musí být jasné, zda byla změna aplikována, zda je třeba ji potvrdit, nebo zda byla zrušena. Nejednoznačné dialogy, u nichž uživatel vidí náhled změny, ale změna se bez potvrzení neuloží, představují typický zdroj částečného selhání v jinak jednoduchých úlohách.

Šestým návrhem bylo **lépe řídit pohyb v 3D prostoru**. Participantů někdy aplikovali strategie známé z 2D map, například nadměrné zoomování nebo práci pouze v pohledu shora. Vhodné by bylo doplnit jasnější návrat do výchozího pohledu, omezení příliš detailního zoomu, prostorové limity pohybu mimo oblast dat a případně vizuální indikace, jaký pohled je pro danou metodu analyticky vhodný. U metod, kde je interpretace výšky zásadní, by aplikace mohla uživatele aktivně navést ke změně úhlu pohledu.

Sedmým návrhem bylo **doplnit úvodní seznámení s aplikací**. Volná explorace ukázala, že někteří participantů neobjevili ani základní princip přepínání metod. Krátký onboarding, ukázková animace, zvýraznění klíčových prvků nebo interaktivní průvodce by mohl uživatelům pomoci vytvořit si správný mentální model aplikace dříve, než začnou řešit analytické úlohy.

Významným praktickým výstupem celé studie bylo, že její výsledky byly následně využity při vývoji **nové verze aplikace 3D-Geo-Vis 2.0**⁵⁰. Zdrojové kódy této upravené aplikace jsou také zpřístupněny online⁵¹. Nová verze již nebyla pouze drobnou úpravou původního prototypu, ale představovala podstatnější přepracování konceptu. Oproti původní verzi umožnila přidávat vlastní data z ArcGIS Online prostřednictvím URL, pracovat se sedmi metodami 3D geovizualizace v integrovanějším prostředí, upravovat grafické proměnné podle zvolené metody, vybírat atributy pro tematickou vizualizaci a popis, spravovat vrstvy, kombinovat více datových zdrojů a metod v jednom prostředí, automaticky přibližovat na rozsah dat a sdílet aktuální stav aplikace pomocí unikátní URL.

Z pohledu výsledků PS5 je zvláště důležité, že nová verze **reagovala právě na problémy identifikované v testování**. Původní stránková struktura jednotlivých metod byla nahrazena integrovanějším řešením, které lépe propojuje vizualizační metody, datové vrstvy a grafické proměnné. Tím bylo částečně řešeno nízké zvýraznění přepínání metod i nevyvážené soustředění pozornosti na pravý panel. Zároveň byla posílena datová flexibilita aplikace, protože původní prototyp pracoval pouze s předem připravenými daty. Nová verze se tím posunula od demonstračního prototypu směrem k analytickému nástroji pro interaktivní 3D tematickou geovizualizaci.

Je však nutné dodat, že ani nová verze automaticky neodstraňuje všechny metodologické a technické výzvy spojené s 3D geovizualizací. Výkonové limity u náročných metod, zejména voxelových vizualizací, mohou být ovlivněny použitou technologií, objemem dat, prostorovým rozsahem i síťovými podmínkami. Stejně tak přetrvává obecná interpretační náročnost

⁵⁰ Žejdlík, Jakub. *3D-Geo-Vis 2.0* [online]. Olomouc: Katedra geoinformatiky, Univerzita Palackého v Olomouci, [b. r.] [cit. 2026-05-19]. Dostupné z: https://jakubzejdlík.github.io/3d_geo_vis_2/

⁵¹ Žejdlík, Jakub. *3d_geo_vis_2* [software]. GitHub [online]. [b. r.] [cit. 2026-05-19]. Dostupné z: https://github.com/jakubzejdlík/3d_geo_vis_2

3D prostředí, v němž se mohou objevovat problémy s perspektivou, překryvem, srovnáváním hodnot v hloubce a volbou vhodného úhlu pohledu. Přesto lze říci, že testování PS5 poskytlo konkrétní empirický základ pro směřování návrhových úprav.

Závěrem lze konstatovat, že případová studie PS5 naplnila dvojí roli. Na straně hodnocené aplikace umožnila **identifikovat konkrétní problémy** prototypu 3D-Geo-Vis a převést je do návrhových doporučení, která byla následně zohledněna při vývoji aplikace 3D-Geo-Vis 2.0. Na straně metodologie disertační práce ukázala, že pro hodnocení komplexních interaktivních 3D kartografických vizualizací je nezbytné kombinovat více zdrojů dat. **Eye-tracking** poskytl vhled do vizuální pozornosti, váhání a přehlížení prvků rozhraní, a to i přestože nebyly vypočteny žádné eye-tracking metriky. **MapLogger** zachytil konkrétní interakční chování, typy akcí, časování a kontext úloh. **UEQ** a **subjektivní dotazník** doplnily informace o tom, jak participanti aplikaci vnímali. Teprve propojení těchto vrstev umožnilo přesvědčivě rozlišit, zda problém vznikl kvůli rozhraní, výkonu, nejasné terminologii, interpretační náročnosti 3D reprezentace nebo individuální strategii participanta.

Tato PS5 zároveň **uzavřela praktickou část disertační práce**. V návaznosti na předchozí případové studie ukázala nejpokročilejší podobu metodologického rámce pro hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací s využitím mnoha metod. Zatímco dřívější studie ověřovaly dílčí přístupy na jednodušších nebo specificky zaměřených produktech, PS5 propojila eye-tracking, logování interakcí, výpočet metrik použitelnosti a subjektivní hodnocení v jednom komplexním testování reálné 3D webové aplikace. Přestože eye-tracking byl v PS5 analyzován pouze kvalitativně formou inspekce záznamů, poskytl hodnotné informace o problémech aplikace. Z hlediska komplexity metodologie analýzy eye-tracking dat tak zůstává nejkompaktnější PS3, ve které byl eye-tracking upřednostněn. Jak ale bylo zjištěno, eye-tracking sám o sobě nestačí k hodnocení použitelnosti IKV.

Následující kapitola *Výsledky* již nebude zaměřena na rozbor jednotlivých případových studií, ale na souhrnné vyhodnocení celé disertační práce a syntézu poznatků získaných napříč všemi studiemi.

Veškerá podkladová data pro PS5 jsou k dispozici v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky UP a dále na datovém úložišti disertační práce (viz kapitola Přílohy).

VÝSLEDKY

8 VÝSLEDKY

Výsledky disertační práce prokázaly, že hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking nelze chápat jako pouhé rozšíření klasických experimentů nad statickými mapami. IKV představují proměnlivé, komplexní a uživatelsky ovlivnitelné prostředí, v němž se vizuální pozornost, interakční chování, úspěšnost řešení úloh a subjektivní zkušenost uživatele vzájemně podmiňují. Hlavním výsledkem práce proto nebylo pouze zjištění, jak si uživatelé vedli při práci s pěti hodnocenými produkty, ale především empiricky podložené ukotvení metodologického postupu, který umožnil tyto produkty hodnotit v jejich skutečné dynamice. Původní pojetí mezi jednotlivými částmi výzkumu tak netvořila pouze interaktivita a metoda eye-tracking, ale širší problém hodnocení mapových rozhraní jako komplexních interakčních systémů, v nichž bylo nutné propojit kartografickou interpretaci, kognitivní zpracování, chování uživatele, metriky použitelnosti a konkrétní technické možnosti dostupných analytických nástrojů.

První dílčí cíl práce, tedy systematické zmapování stávajícího výzkumu, ukázal, že problematika hodnocení IKV metodou eye-tracking byla v odborné literatuře řešena poměrně intenzivně, avšak **metodologicky nejednotně**. Do finálního souboru bylo zařazeno 87 studií, které byly analyzovány prostřednictvím sedmi výzkumných otázek. Výsledky ukázaly, že nejčastěji hodnoceným typem interaktivní kartografické vizualizace byly interaktivní **2D digitální mapy**, které tvořily přibližně **59 %** identifikovaných stimulů; konkrétně šlo o 41 studií. Výrazně méně zastoupená byla imerzivní VR prostředí, identifikovaná v devíti studiích, interaktivní 3D vizualizace v šesti studiích, mobilní interaktivní vizualizace a desktopové GIS aplikace ve čtyřech studiích, experimenty v reálném prostředí ve třech studiích a rozhraní typu street view ve dvou studiích. Rozšířená realita se v empirickém souboru neobjevila vůbec, ačkoliv byla v literatuře opakovaně diskutována jako perspektivní směr výzkumu. Tento výsledek potvrdil, že kartografická komunita se hodnocením interaktivních aplikací již systematicky zabývá, ale současně ukázal, že největší část empirické evidence se stále opírá o relativně tradiční 2D počítačová prostředí.

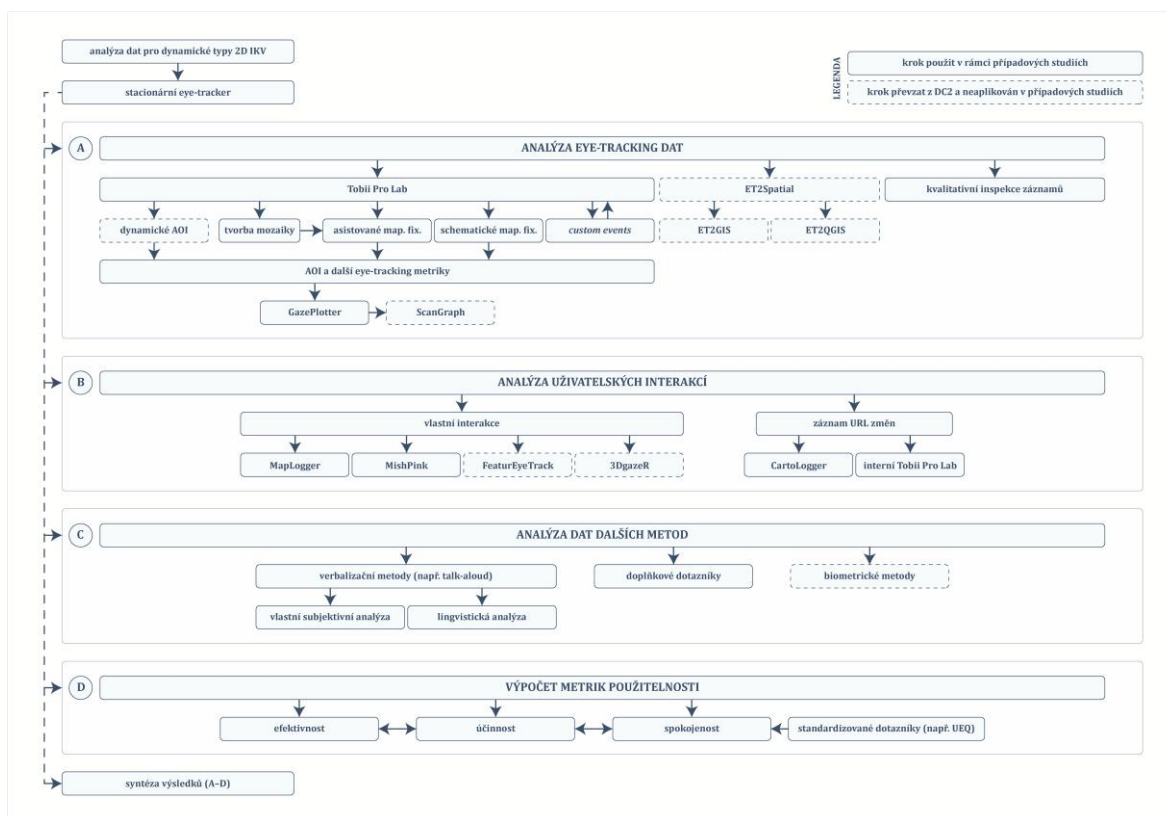
Analýza použitých eye-tracking metrik potvrdila dominanci klasických ukazatelů založených na fixacích, sekvencích fixací a AOI. **Fixace** byly identifikovány v 51 studiích, **sekvence fixací** ve 37 studiích, **AOI analýza** ve 29 studiích, **sakády** v 19 studiích a metrika **TTF** ve 13 studiích. Z hlediska vizualizace dat dominovaly **heatmapy**, které byly použity v 35 studiích. Současně se však ukázalo, že pokročilejší analytické přístupy, například 3D analýza pohledu, GIS-orientovaná transformace eye-tracking dat nebo automatizované klasifikační metody, byly zastoupeny pouze okrajově. V kombinaci s metodou eye-tracking byla nejčastěji hodnocena **efektivnost**, zastoupená ve 34 studiích, dále **účinnost** ve 24 studiích a **spokojenost** ve 23 studiích. **Logování uživatelských interakcí** se objevilo ve 21 studiích, zatímco **verbalizační metody** typu think-aloud nebo talk-aloud pouze v sedmi studiích. Standardizované dotazníky byly využívány méně často, například **SUS** ve čtyřech studiích, **NASA-TLX** ve čtyřech studiích a **UEQ** pouze ve třech studiích. Tento výsledek byl zásadní pro další směřování disertace, protože potvrdil potřebu kombinovat eye-tracking s dalšími zdroji

dat a současně akcentoval nedostatečné využívání standardizovaných nástrojů pro zachycení subjektivní složky použitelnosti a uživatelské zkušenosti.

Systematické mapování dále ukázalo, že nejčastějšími typy úloh v dosavadních studiích byly úlohy **vyhledávací** a **analytické**. Vyhledávací úlohy byly identifikovány ve 47 studiích a celkem ve 107 výskytech, analytické úlohy ve 36 studiích a 94 výskytech. Navigační úlohy se objevily ve 24 studiích a 52 výskytech, explorativní či otevřené úlohy rovněž ve 24 studiích, avšak pouze ve 32 výskytech. Méně časté byly úlohy srovnávací, plánovací, paměťové, orientační a scénářové. Tento výsledek ukázal, že výzkum interaktivních map sice pracuje s poměrně širokým spektrem úloh, avšak stále často směřuje k dobře kontrolovatelným experimentálním situacím. To je metodologicky pochopitelné, ale zároveň to omezuje schopnost zachytit přirozenější interakční strategie uživatelů. Právě proto byly v empirické části této práce zahrnuty nejen cílené úlohy se správnou odpovědí, ale také **explorační** a **preferenční** úlohy, které umožnily sledovat širší spektrum uživatelského chování.

Druhý dílčí cíl práce navázal na systematické mapování syntézou vhodných **metod a nástrojů**. Výsledkem této části bylo **dílčí metodologické schéma**, které sloužilo jako rozhodovací rámec pro návrh případových studií. Toto schéma zahrnovalo typ eye-tracking zařízení, typ interaktivní kartografické vizualizace, dostupné analytické nástroje, metriky eye-tracking, metriky použitelnosti, logování interakcí, verbalizační metody, dotazníky a další doplňkové přístupy. Již v této fázi bylo zřejmé, že žádný dostupný nástroj nepokrývá celý proces hodnocení interaktivní mapy. Nástroje jako Tobii Pro Lab, Gazepoint Analysis Professional, GazePlotter, ScanGraph, GIS-orientované nástroje, MapLogger, CartoLogger, RealEye, WebGazer nebo Pupil Cloud představovaly dílčí řešení, ale jejich užitečnost vždy závisela na konkrétním stimulu, typu zařízení, dynamice rozhraní a cíli analýzy. Výsledkem DC2 proto nebyl výběr jednoho dominantního nástroje, ale návrh **komplexního metodologického přístupu**.

Nejdůležitějším výsledkem celé disertační práce bylo následné **zpřesnění tohoto metodologického rámce** na základě pěti empirických případových studií. V návaznosti na praktické zkušenosti bylo původní schéma z DC2 upraveno do podoby zaměřené na analýzu dat pro dynamické typy 2D IKV při použití stacionárního eye-trackeru (**Obrázek 104**). Toto zúžení nebylo slabinou, ale vědomým metodologickým rozhodnutím. Stacionární eye-tracking zařízení byla v případových studiích využívána nejčastěji a současně poskytovala nejstabilnější empirickou základnu pro formulaci ověřeného postupu. Upravené schéma proto nezobecňovalo nepřiměřeně na všechny typy zařízení a všechny formy interaktivních vizualizací, ale soustředilo se na tu oblast, kde byla opora ve vlastních datech nejsilnější. Právě tím se odlišuje od obecného přehledu metod. Nejde tedy pouze o teoretický soupis možností, ale o empiricky korigovaný rámec vycházející z konkrétních experimentálních zkušeností.



Obrázek 104: Metodologické schéma pro analýzu dat dynamických 2D interaktivních kartografických vizualizací při použití stacionárního eye-trackeru.
Obrázek v plném rozlišení je k dispozici na datovém úložišti disertační práce (viz kapitola Přílohy)

Obrázek 104 tak syntetizuje výsledky práce do **čtyř** vzájemně navazujících analytických **vrstev**. První vrstva **(A)** se týká **analýzy eye-tracking dat** a zahrnuje zejména postupy realizované v prostředí Tobii Pro Lab, tedy asistované mapování fixací, tvorbu mozaiky, schematické mapování fixací a využití *custom events*. Dále zahrnuje AOI a další eye-tracking metriky, sekvenční analýzu v nástroji GazePlotter, případně komparační analýzu v nástroji ScanGraph. Do této vrstvy byly zahrnuty také GIS-orientované nástroje ET2Spatial, ET2GIS a ET2QGIS, které byly převzaty z DC2 jako metodologicky relevantní, avšak v rámci případových studií nebyly všechny empiricky ověřeny, přestože ET2QGIS je vlastním nástrojem autora.

Druhá vrstva schématu **(B)** zahrnuje **analýzu uživatelských interakcí**, konkrétně vlastní interakční logy, MapLogger, MishPink, CartoLogger, záznamy URL změn a interní události z Tobii Pro Lab.

Třetí vrstva **(C)** doplňuje schéma o verbalizační metody, doplňkové dotazníky a případně biometrické metody.

Čtvrtá vrstva schématu **(D)** reprezentuje **výpočet metrik použitelnosti**, tedy účinnost, efektivnost a spokojenost. Zde se ukázalo, že eye-tracking data musí být interpretována společně s úspěšností, dobou řešení úloh a subjektivním hodnocením, zejména prostřednictvím standardizovaných dotazníků, jako je **UEQ**.

Plné linie ve schématu reprezentují metody použité nebo ověřené v případových studiích, zatímco přerušované linie označují postupy převzaté z DC2, které zůstaly metodologicky relevantní, ale nebyly v rámci empirické části plně aplikovány.

Případová studie PS1 ukázala, že u relativně jednoduchých interaktivních map v prostředí datové žurnalistiky bylo možné stále efektivně využívat **tradiční eye-tracking workflow** založené na AOI vymezených nad screenshotem rozhraní. Průměrná úspěšnost řešení osmi úloh dosáhla 57,67 %, přičemž mezi úlohami existovaly výrazné rozdíly. Nejvyšší úspěšnosti dosáhly úlohy Q3 s hodnotou 79,55 % a Q6 s hodnotou 77,27 %, zatímco nejméně úspěšné byly Q8 s hodnotou 20,45 % a Q1 s hodnotou 34,09 % (viz **Tabulka 6**). Nejdelší průměrný čas řešení byl zaznamenán u úlohy Q8, konkrétně 110,99 s, zatímco nejkratší průměrný čas měla úloha Q6 s hodnotou 56,83 s. Tyto výsledky ukázaly, že nízká úspěšnost a dlouhý čas řešení byly často spojeny s nedostatečnou objevitelností interaktivních prvků, nikoliv pouze s obtížností tematického obsahu. Analýza dále ukázala, že participantů věnovali výrazně **více relativní pozornosti textové části článků než mapám**. Po normalizaci podle velikosti AOI věnovali laici textu přibližně 10,91× více relativní pozornosti než grafickým prvkům a experti dokonce 17,46× více. Z hlediska metodologie PS1 prokázala, že **samotná fixace na prvek neznamená jeho pochopení**. Teprve kombinace AOI, TOI, GazePlotter sekvencí, manuální inspekce záznamů a verbalizace umožnila rozlišit, zda participant interaktivní prvek přehlédl, nepochopil, nebo jej sice použil, ale nesprávně interpretoval.

Případová studie PS2 posunula metodologický rámec k dynamičtější interaktivní aplikaci „Proměny Olomouce v čase“. Výsledky standardizovaného dotazníku **UEQ** byly velmi pozitivní. Nejvyšší hodnotu dosáhla *Atraktivita* s $M = 2,35$, *Přehlednost* dosáhla $M = 2,43$, *Účinnost* $M = 2,30$ a *Spolehlivost* $M = 1,98$. *Pragmatická kvalita* dosáhla hodnoty 2,23 a *hédonická kvalita* 1,92. V benchmarkovém srovnání UEQ se všech šest škál zařadilo do kategorie *Excellent*.

Doplňkový dotazník ukázal, že 44 participantů, tedy 81,5 %, by aplikaci rozhodně znovu použilo, a zbývajících 10 participantů, tedy 18,5 %, by ji spíše znovu použilo. Negativní odpověď se nevyskytla. Preference metod jednoznačně ukázaly dominanci režimu *Swipe*, který zvolilo 31 participantů, tedy 57,4 %, zatímco *Multiview* preferovalo 18 participantů, tedy 33,3 %, a *Overlay* pouze 5 participantů, tedy 9,3 %. Logované interakce ukázaly, že ve dvoumapových režimech dominovala konfigurace *Historical + Orthophoto* s podílem 63,09 % času. *Ortofoto z roku 2024* tvořilo 29 854,0 s, tedy přibližně 43,6 % veškerého map-time, a fungovalo jako současná referenční kotva pro interpretaci historických vrstev. PS2 tak ukázala, že u komplexnějších mapových rozhraní nestačí pouze klasická AOI analýza, protože stejná pozice na obrazovce může v různých okamžicích představovat odlišný geografický obsah nebo jiný stav rozhraní. Kvalitativní **inspekce eye-tracking záznamů** v kombinaci s **URL logy** a **UEQ** se ukázala jako vhodný způsob, jak propojit subjektivní hodnocení, skutečné používání aplikace a vizuální pozornost.

Případová studie PS3 měla nejvýraznější metodologický charakter. Jejím hlavním přínosem nebylo finální srovnání použitelnosti statického a interaktivního atlasu, ale ověření toho, jak lze eye-tracking data z atlasových produktů převést do analyzovatelné podoby. U statického atlasu bylo využito asistované mapování fixací do snapshotů stran atlasu. Přestože bylo nutné data kontrolovat a v některých případech manuálně opravovat, všechny relevantní fixace ze statické části byly nakonec přiřazeny k odpovídajícím snímkům. U interaktivního atlasu bylo nutné ověřit **tři různé přístupy**. První přístup využíval (i) **asistované mapování fixací** do

statického snímku a ukázal se jako nejefektivnější v situaci, kdy byl mapový obsah relativně stabilní. Druhý přístup kombinoval (ii) **asistované mapování s manuálním zaznamenáváním interaktivních stavů** pomocí *custom events* v Tobii Pro Lab. Byl metodologicky nejbohatší, ale zároveň časově nejnáročnější. Třetí přístup využíval (iii) **schematické mapování** do analytického referenčního obrazu, který integroval mapové pole, legendu, postranní panel a další prvky rozhraní. Porovnání těchto postupů prostřednictvím indexu normalizované náročnosti mapování (INNM) ukázalo, že při typické zátěži byl nejefektivnější první přístup s upravenou délkou mapování 8,89 min a hodnotou INNM = 0,854. Druhý nejlepší byl schematický přístup s upravenou délkou 10,90 min a INNM = 1,047. Nejméně efektivní byl postup kombinující asistované mapování a *custom events* s upravenou délkou 12,06 min a INNM = 1,123. PS3 tak empiricky doložila, že zpracování eye-tracking dat z dynamického kartografického prostředí je samo o sobě významnou metodologickou úlohou a že jeho náročnost závisí nejen na délce záznamu a počtu fixací, ale především na nutnosti zachytit proměnlivé interaktivní stavy.

Případová studie PS4 prokázala **význam interakčních logů** jako samostatného a zároveň komplementárního zdroje dat. Studie ukázala, že typ zařízení nemusel zásadně měnit správnost odpovědí, ale výrazně ovlivňoval způsob práce s mapou. Mobilní zařízení vedlo k vyššímu počtu akcí a navigačně orientované strategii založené na posunu mapy, přibližování a průběžném upravování výřezu. Práce na počítači byla častěji spojena s cílenějším získáváním informací pomocí klikání, pop-up oken a práce s vrstvami. Metodologicky se ukázalo, že původně zamýšlená detailní AOI analýza jednotlivých prvků rozhraní byla v prostředí Gazepoint Analysis Professional prakticky neefektivní. Vzhledem k tomu, že detailní vymezování AOI trvalo přibližně 58 minut pro počítačovou a 50 minut pro mobilní variantu u jednoho participanta, znamenalo by rozšíření tohoto přístupu na celý soubor přibližně 84 hodin práce. Výsledným řešením bylo využití zjednodušených AOI na úrovni jednotlivých úloh, které sice neumožnily detailně oddělit pohled na legendu, mapové pole nebo zadání, ale poskytly srovnatelné task-level metriky. PS4 tak potvrdila, že u dynamických mapových stimulů musí být metodologická přesnost vždy **vyvažována reálnou proveditelností analýzy**. Současně ukázala, že interakční data mohou částečně nahradit některé aspekty eye-tracking analýzy tam, kde je cílem rekonstruovat manipulaci s mapovým rozhraním. Nemohou však plně nahradit informaci o vizuální pozornosti, nejistotě nebo přehlížení prvků. Nejpřesvědčivější interpretační hodnotu měla proto **jejich kombinace**.

Případová studie PS5 představovala **nejkomplexnější** aplikaci celého metodologického rámce z pohledu počtu a významu použitých metod mimo eye-tracking. Zároveň zde byla použita nejkomplexnější IKV ze všech případových studií. Hodnocení 3D aplikace 3D-Geo-Vis prokázalo, že aplikace byla obecně použitelná, ale její použitelnost byla omezena kombinací tří faktorů: **složitostí** 3D tematické vizualizace, **strukturou** uživatelského rozhraní a **technickou odezvou** aplikace. U cílených úloh byla nejvyšší míra plného splnění zjištěna u T2, kterou plně splnilo 87,0 % participantů (viz **Tabulka 13**). Úloha T3 byla plně splněna 46 participanty, tedy 85,2 %, částečně šesti participanty, tedy 11,1 %, a nesplněna dvěma participanty, tedy 3,7 %. Nejnižší úspěšnost vykazala úloha T4 navázaná na metodu *Voxels*, kterou plně vyřešilo 42 participantů, tedy 77,8 %, částečně šest participantů, tedy 11,1 %, a dalších šest participantů ji nevyřešilo. Úloha T5 byla plně dokončena 46 participanty, tedy 85,2 %, částečně sedmi participanty, tedy 13,0 %, a u jednoho participanta nebyl výsledek vyhodnotitelný. **UEQ** ukázal pouze mírně pozitivní až neutrální profil uživatelské zkušenosti. *Pragmatická kvalita*

dosáhla hodnoty $M = 0,34$, *hédonická kvalita* $M = 0,15$ a *Atraktivita* $M = 0,392$. Nejvýrazněji problematická byla položka *rychlý–pomalý* s hodnotou přibližně $M = -1,5$, což korespondovalo s otevřenými odpověďmi participantů i kvalitativní inspekci záznamů. V benchmarkovém srovnání UEQ spadlo pět škál do kategorie **Bad** a pouze *Originalita* do kategorie *Below Average*, což tedy ukázalo, že prototypová verze aplikace měla značný prostor pro zlepšení. **Eye-tracking** poskytl cenné vhledy do vizuálního chování participantů inspekci záznamů, čímž byly kvalitativně identifikovány nedostatky aplikace.

Interakční logy v PS5 představovaly mimořádně důležitou vrstvu výsledků. Data byla získána vlastním nástrojem MapLogger, který byl vyvinut pro účely této disertační práce. Za 54 participantů bylo získáno 54 CSV souborů. Po vyloučení meta událostí bylo zaznamenáno 15 457 interakcí, při započtení meta událostí 18 642 řádků. Průměrný počet interakcí na participanta byl 286, mediánová délka experimentu 11,5 minuty a průměrná intenzita interakcí 24,3 interakcí za minutu. Minimum bylo 75 a maximum 745 interakcí na participanta. Dominantním typem interakce bylo kliknutí myši, kterých bylo zaznamenáno 7 841. Agregovaná heatmapa byla vytvořena z 12 762 interakčních bodů při rozlišení 1920×896 px a ukázala tři hlavní oblasti koncentrace interakcí: horní navigační lištu s přepínači vizualizačních metod, pravý postranní panel a mapové pole. V otevřených odpovědích se rychlost, odezva nebo grafický výkon objevily u 25 z 35 participantů, kteří poskytli komentář k vylepšení, tedy u 71,4 %. Výsledky PS5 byly následně **využity při vývoji aplikace 3D-Geo-Vis 2.0**, která již pracovala s integrovanějším prostředím pro sedm metod 3D geovizualizace, umožnila přidávání vlastních dat z ArcGIS Online prostřednictvím URL, správu vrstev, úpravu grafických proměnných, kombinaci více datových zdrojů a sdílení aktuálního stavu aplikace pomocí unikátní URL. Tím se výsledky disertační práce promítly nejen do metodologické roviny, ale také do konkrétního návrhového výstupu.

Souhrnně lze konstatovat, že pět případových studií vytvořilo postupnou metodologickou gradaci. **PS1** ověřila použitelnost klasické AOI analýzy u méně dynamických interaktivních map. **PS2** ukázala nutnost kombinovat kvalitativní eye-tracking inspekci s logy a standardizovaným UX hodnocením u komplexnějších 2D mapových aplikací. **PS3** prokázala, že analýza atlasových produktů vyžaduje převod dynamického nebo real-world záznamu do analyzovatelné referenční struktury a že pracnost takového převodu je nutné metodologicky zohlednit. **PS4** doložila, že interakční logy jsou pro hodnocení interaktivních map mimořádně cenné a v některých ohledech škálovatelnější než detailní eye-tracking analýza. **PS5** pak propojila všechny hlavní vrstvy hodnocení v jednom komplexním experimentu nad 3D geovizualizační aplikací. Tato posloupnost ukázala, že s rostoucí mírou dynamiky a interaktivity klesá samostatná výpovědní hodnota izolovaných eye-tracking metrik a roste **význam triangulace**.

Výsledky práce proto vedou k formulaci několika obecných metodologických závěrů:

- ↳ 1) eye-tracking je při hodnocení IKV nejvhodnější chápat jako **diagnostický nástroj** vizuální pozornosti, nikoliv jako samostatný a dostatečný zdroj vysvětlení uživatelského chování.
- ↳ 2) fixace, AOI, heatmapy nebo sekvence pohledu je nutné interpretovat ve vztahu k aktuálnímu stavu rozhraní, úloze, předchozí interakci a případně verbálnímu projevu participanta.
- ↳ 3) u dynamických map není možné automaticky předpokládat stabilní vztah mezi souřadnicí obrazovky a geografickým nebo informačním obsahem.
- ↳ 4) logování interakcí se ukázalo jako klíčový doplněk eye-tracking metody, protože poskytuje časovou a behaviorální kostru průběhu řešení úlohy.
- ↳ 5) subjektivní hodnocení participanta, zejména prostřednictvím UEQ, umožňuje odlišit technicky úspěšné splnění úlohy od skutečně pozitivní uživatelské zkušenosti.
- ↳ 6) verbalizační a kvalitativní přístupy jsou nezbytné tam, kde je potřeba rozlišit přehlednutí prvku, nepochopení jeho významu, nesprávnou interpretaci dat nebo nejistotu vyvolanou rozhraním.

Praktická zjištění napříč případovými studiemi ukázala opakující se návrhové problémy IKV. Nejvýznamnějším problémem byla **objevitelnost interaktivních funkcí**. Uživatelé často nepředpokládali, že mapa nebo její část je interaktivní, případně hledali funkci v nesprávné části rozhraní. Tento problém se projevil u *hover* interakcí v datové žurnalistice, u přepínání režimů srovnání v historickém mapovém srovnávači, u práce s tematickými vrstvami v interaktivním atlasu i u přepínání metod v aplikaci 3D-Geo-Vis. Druhým opakujícím se problémem byla **nedostatečná zpětná vazba systému**. Uživatelé si někdy nebyli jisti, zda se změna provedla, zda se data stále načítají, zda pro dané území neexistují, nebo zda je nutné akci potvrdit. Třetím problémem byla **kognitivní zátěž** způsobená nejasnou strukturou rozhraní, zejména pokud nebylo zřetelné, co je podkladová mapa, tematická vrstva, vizualizační metoda, parametr znaku nebo pouze pomocný ovládací prvek. Čtvrtým problémem bylo **riziko přenosu strategií** ze známých 2D map do prostředí, kde již nejsou vhodné, zejména u 3D geovizualizací. Pátým problémem byla **technická odezva**, která se v případě 3D aplikace ukázala jako přímá součást vnímané použitelnosti, nikoliv pouze jako implementační detail.

Celkové výsledky disertační práce potvrzují, že kartografická komunita se nachází v pokročilé fázi řešení hodnocení interaktivních mapových aplikací, avšak stále existuje významná metodologická mezera mezi obecnými principy použitelnosti, dostupnými eye-tracking metrikami a praktickou analýzou dynamických kartografických rozhraní. Přínos této disertační práce spočívá právě v **propojení těchto rovin**. Práce neprezentovala eye-tracking jako izolovanou metodu, ale jako součást širšího hodnotícího ekosystému, v němž se kombinují vizuální, behaviorální, výkonnostní, subjektivní a kvalitativní data. Upravené metodologické schéma (**Obrázek 104**) proto představuje **hlavní syntetický výsledek práce**. Slouží jako empiricky podložená inspirace pro výzkumníky, kteří plánují hodnotit dynamické 2D interaktivní kartografické vizualizace pomocí stacionárního eye-tracking zařízení a potřebují zvolit vhodnou kombinaci analytických postupů. Současně ukazuje, že **budoucí výzkum** by měl směřovat k hlubší integraci eye-tracking dat s interakčními logy, stavem

aplikace, URL sekvencemi, dotazníky, verbalizačními metodami a případně GIS-orientovanou transformací eye-tracking dat.

Hlavní cíl disertační práce byl tímto naplněn ve dvou rovinách:

- ↳ **V aplikační rovině** byly zhodnoceny konkrétní interaktivní kartografické produkty a formulována doporučení pro jejich zlepšení.
- ↳ **V metodologické rovině** byl vytvořen, ověřen a zpřesněn rámec pro hodnocení interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking a doplňkovými metodami.

Výsledky ukázaly, že použitelnost interaktivní mapy nelze spolehlivě odvodit pouze z toho, zda uživatel našel správnou odpověď, ani pouze z toho, kam se díval. Spolehlivější interpretace vznikla až propojením toho, kam se uživatel díval, co s rozhraním dělal, jak dlouho mu to trvalo, zda uspěl, jak aplikaci hodnotil a jaké problémy bylo možné pozorovat v záznamu. Tím práce poskytla prakticky použitelný a metodologicky ukotvený příspěvek k hodnocení interaktivních kartografických vizualizací v kontextu kognitivní kartografie, HCI a uživatelsky zaměřeného návrhu.

DISKUSE

9 DISKUSE

Výsledky disertační práce potvrdily, že hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking se nachází na pomezí kartografie, kognitivní psychologie, human-computer interaction a vývoje webových aplikací. V tomto smyslu nebyla práce založena pouze na spojení dvou tematických oblastí, tedy interaktivity a eye-tracking. Takové vymezení by bylo příliš úzké a nevystihovalo by podstatu řešeného problému. Skutečným jádrem práce byla otázka, jak hodnotit uživatelskou práci s proměnlivým kartografickým rozhraním, jehož obsah, měřítko, stav vrstev, viditelné prvky i dostupná interpretace se mění v čase podle interakcí uživatele. Eye-tracking v tomto rámci představoval jeden z klíčových zdrojů dat, nikoliv samostatné řešení. Interaktivita byla vlastností hodnocených produktů, nikoliv dostatečným metodologickým pojítkem. Spojujícím prvkem všech částí práce se proto stal **širší problém uživatelského hodnocení** dynamických mapových systémů, v nichž bylo nutné propojit vizuální pozornost, interakční chování, výkonnostní metriky, subjektivní hodnocení a kvalitativní interpretaci průběhu řešení úloh.

Rozdílná role metody eye-tracking se projevila také napříč jednotlivými případovými studii. V **PS1** bylo vzhledem k relativně stabilním interaktivním mapám v datové žurnalistice možné využít především klasickou AOI analýzu a sekvenční vizualizace průběhu vizuální pozornosti. V **PS2** již byla eye-tracking data interpretována ve vztahu ke komplexnějšímu stavu webové aplikace a sloužila zejména jako podklad pro kvalitativní inspekci záznamů. Metodologicky nejkomplexnější eye-tracking analýza byla realizována v **PS3**, kde bylo nutné řešit převod dat ze statického i interaktivního atlasu do analyzovatelné podoby a porovnat různé strategie mapování fixací. V **PS4** byl eye-tracking doplněn interakčními logy, které umožnily lépe zachytit konkrétní akce uživatelů na stolním a mobilním zařízení. Ačkoliv **PS5** představovala nejkomplexnější případovou studii z hlediska hodnoceného stimulu a počtu kombinovaných metod, její komplexita nespočívala v náročnosti samotné eye-tracking analýzy, ale v propojení metod eye-tracking, MapLogger, UEQ, doplňkového dotazníku, metrik použitelnosti a kvalitativní inspekce záznamů. Toto srovnání také potvrdilo, že eye-tracking sám o sobě není pro hodnocení použitelnosti IKV dostačující, avšak i při rozdílné míře analytické hloubky umožnil ve všech případových studiích identifikovat problémy použitelnosti, které by z ostatních datových zdrojů nebyly vždy jednoznačně patrné.

Toto pojetí je důležité také vzhledem k současnému stavu kartografického výzkumu. Hodnocení interaktivních mapových aplikací již není novou ani okrajovou oblastí. Kartografická komunita se dlouhodobě zabývá použitelností webových map, interakčním designem, kognitivními aspekty práce s mapou, rozdílly mezi statickými a dynamickými stimuly, vlivem zařízení na interakci i možnostmi kombinace metody eye-tracking s dalšími metodami. Přínos této disertační práce proto nespočíval v obecném konstatování, že interaktivní mapy je vhodné testovat nebo že eye-tracking může být pro takové testování užitečný. Tyto skutečnosti jsou v literatuře již poměrně dobře ukotveny a jsou reflektovány v teoretické části této práce. Přínos práce ale spočíval v empirickém rozpracování toho, jak lze takové testování **prakticky provádět** v situacích, kdy tradiční postupy převzaté ze statických

map narážejí na **technické a interpretační limity**. Práce tak akcentovala současnou pokročilost oboru nikoliv tím, že by existující výzkum nahrazovala, ale tím, že na něj navázala a posunula diskusi směrem k proveditelnosti, kombinaci metod a zpracování dat z reálných dynamických kartografických aplikací.

Systematické mapování literatury ukázalo, že výzkum v této oblasti je bohatý, ale zároveň **metodologicky roztržštěný**. V analyzovaných studiích se opakovaly tradiční eye-tracking metriky, zejména fixace, AOI analýza, sekvence pohledu a heatmapy, avšak jejich použití bylo značně závislé na konkrétním typu stimulu, úlohy a technického řešení. Z tohoto hlediska se potvrdilo, že metriky samy o sobě nezaručují interpretovatelný výsledek. Fixace na mapový prvek může znamenat porozumění, nejistotu, opakované hledání, chybnou interpretaci nebo pouhé vizuální zachycení výrazného objektu. Podobně delší čas řešení úlohy může znamenat vyšší kognitivní náročnost, technický problém, neobjevenou interakci, strategické ověřování odpovědi nebo neporozumění zadání. Popis výsledků proto musí vycházet z toho, že eye-tracking poskytuje velmi **přesný záznam o vizuálním chování**, ale pouze **omezený záznam o důvodech** tohoto chování. Interpretace se stává přesvědčivou teprve tehdy, pokud je eye-tracking záznam propojen s úlohou, stavem aplikace, interakcemi, verbálními projevy a výsledkem řešení.

Tato skutečnost se opakovaně potvrdila ve všech případových studiích. U jednodušších interaktivních map v datové žurnalistice bylo možné využít tradiční AOI analýzu nad screenshoty, protože mapové stimuly byly ve srovnání s pozdějšími studiemi relativně stabilní. Přesto se ukázalo, že ani zde nestačila samotná kvantifikace pohledu. Problémem nebylo pouze to, zda uživatel sledoval mapu, legendu nebo text, ale zda pochopil, že konkrétní prvek lze použít, zda rozuměl jeho funkci a zda dokázal interakci převést do správné odpovědi. Zjištění, že uživatelé věnovali v prostředí datové žurnalistiky výraznou pozornost textu a že některé interaktivní prvky zůstávaly přehlížené nebo nepochopené, potvrzuje obecnější problém narativních webových rozhraní. Mapa zde nesoutěží pouze s jinými mapovými prvky, ale s celou strukturou článku, textem, grafikami, scrollováním, reklamními nebo systémovými prvky a očekáváním čtenáře, že článek má být primárně čten, nikoliv analyticky prozkoumáván. V tomto smyslu se použitelnost interaktivní mapy ve článku neodvíjí pouze od kartografické správnosti nebo estetické kvality, ale od toho, zda je interaktivita dostatečně signalizována a začleněna do toku čtení.

U historického mapového srovnávače nastala otázka, jak hodnotit aplikaci, která je z hlediska subjektivního hodnocení velmi dobře přijímána, ale přesto obsahuje dílčí interakční problémy. Výsledky UEQ ukázaly velmi pozitivní uživatelskou zkušenost, avšak eye-tracking a logy současně identifikovaly situace, kdy participanti pouze krátce kontrolovali ovládací prvky, hledali funkce v nesprávné části rozhraní, spoléhali na současnou ortofotomapu jako referenční kotvu nebo preferovali určité srovnávací režimy před jinými. Tato kombinace ukazuje důležitý interpretační problém standardizovaných dotazníků, kdy pozitivní globální hodnocení aplikace neznamena absenci lokálních bariér. Uživatel může aplikaci považovat za atraktivní, přehlednou a užitečnou, a přesto může v konkrétním okamžiku přehlédnout ovládací prvek, znejistit při načítání dat nebo nevyužít všechny dostupné režimy. Výsledky PS2 proto podporují interpretaci, že dotazníkové hodnocení je vhodné chápat jako vrstvu subjektivní zkušenosti, nikoliv jako náhradu za behaviorální a vizuální data.

Případová studie interaktivního atlasu a jeho statické varianty ukázala nejvýrazněji, že hlavním problémem není pouze sběr eye-tracking dat, ale jejich následné **převedení do analyzovatelné podoby**. U statických map je vztah mezi obrazovkou, mapovým obsahem a AOI relativně stabilní. U interaktivního atlasu se však tento vztah mění s každým posunem, změnou měřítka, otevřením panelu, použitím legendy nebo změnou viditelného obsahu. Z tohoto důvodu bylo nutné testovat více analytických přístupů, od asistovaného mapování přes mozaiku až po schematické mapování a využití *custom events*. Tato studie ukázala, že v dynamických kartografických prostředích se významná část výzkumné práce přesouvá ze samotného experimentu do **fáze rekonstrukce a anotace dat**. Tento závěr je podstatný v tom, že řada metodologických textů popisuje eye-tracking jako objektivní a relativně automatizovanou metodu. V případě interaktivních map je však objektivita měření doprovázena **vysokou mírou interpretační a zpracovatelské práce**. Bez transparentního popisu toho, jak byly fixace mapovány, jak byly definovány stavy rozhraní a jak byly řešeny změny měřítka, mohou být výsledky **obtížně reprodukovatelné**.

V tomto kontextu byla navržena a použita **metrika normalizované náročnosti mapování**, která umožnila alespoň rámcově oddělit samotnou délku záznamu a počet fixací od pracnosti analytického postupu. Tato metrika nepředstavuje univerzální standard a její použití je nutné chápat jako experimentální metodologický návrh. Její význam však spočívá v tom, že pojmenovala problém, který je v eye-tracking studiích často skrytý, tedy různé analytické postupy se mohou lišit nejen přesností a informační hodnotou, ale také náklady na zpracování. Metoda, která poskytuje nejbohatší data, nemusí být v praxi použitelná pro rozsáhlejší soubory participantů. Naopak jednodušší metoda může být vhodnější pro formativní hodnocení, pokud poskytne dostatečnou oporu pro návrhová doporučení. Efektivita analytických postupů by se proto měla stát běžnou součástí metodologického popisu eye-tracking studií s interaktivními mapami.

Případová studie zaměřená na interakce na stolním a mobilním zařízení dále potvrdila, že použitelnost interaktivní mapy nelze hodnotit pouze podle správnosti odpovědi nebo času řešení. Výsledky ukázaly, že typ zařízení nemusel výrazně měnit přesnost odpovědí, ale měnil **strukturu interakcí**. Mobilní zařízení vedlo k častějším a více navigačně orientovaným akcím, zatímco počítač podporoval cílenější získávání informací prostřednictvím kliknutí, pop-up oken a práce s vrstvami. Tento výsledek je důležitý v tom, že ukazuje, že podobný výkon může být dosažen odlišnými strategiemi. Z hlediska návrhu aplikací to znamená, že responzivita nemůže být chápána pouze jako grafické přizpůsobení obrazovce. Uživatel na mobilním telefonu často pracuje s menším přehledem, fragmentovanějším prostorem a jiným typem vstupu. Interakční logy zde poskytly výpověď, kterou by klasické metriky použitelnosti nezachytily dostatečně přesně. Současně však tato studie ukázala limity dostupných nástrojů pro eye-tracking analýzu, protože detailní AOI vyhodnocení bylo při dané dynamice a rozsahu dat prakticky neefektivní. Kvalitativní inspekce eye-tracking videí proto nebyla metodologickým ústupkem, ale **racionální volbou** odpovídající poměru mezi přínosem a náklady analýzy.

Studie 3D-Geo-Vis posunula problematiku do ještě komplexnější oblasti, protože 3D kartografická vizualizace přidává k problémům 2D interaktivity další vrstvu: perspektivu, kameru, hloubku, překryvy, stíny, proměnlivé měřítko, výkon renderování a nutnost aktivní prostorové orientace. Výsledky ukázaly, že uživatelé byli schopni většinu úloh splnit, ale

subjektivní hodnocení aplikace bylo výrazně slabší než u PS2. Vysoká úspěšnost úloh tak neznamená automaticky vysokou uživatelskou zkušenost. Uživatel může úlohu dokončit, ale současně vnímat systém jako pomalý, nejistý, málo plynulý nebo kognitivně náročný. U 3D aplikace se navíc ukázalo, že technický výkon není pouze technickou vlastností aplikace, ale přímo **ovlivňuje použitelnost**. Latence, pomalé vykreslování a neplynulá manipulace mohou zvyšovat kognitivní zátěž, narušovat orientaci a vést k chybným nebo nadbytečným interakcím. Výkon systému je proto u interaktivních 3D map nutné chápat jako součást uživatelského rozhraní.

Napříč případovými studiemi se jako nejsilnější metodologický závěr ukázala nutnost **triangulace**. Eye-tracking umožnil sledovat, kam uživatelé směřovali vizuální pozornost, kde váhali a které prvky přehlíželi. Logy interakcí umožnily rekonstruovat, co skutečně udělali, v jakém pořadí a v jakém stavu aplikace. Metriky účinnosti a efektivnosti umožnily určit, zda úlohu splnili a za jak dlouho. Dotazníky doplnily subjektivní vnímání systému, jeho atraktivity, srozumitelnosti, spolehlivosti a rychlosti. Verbalizační metody a kvalitativní pozorování poskytly vysvětlení tam, kde samotná čísla nebyla jednoznačná. Tato kombinace se ukázala jako nezbytná zejména proto, že jednotlivé datové vrstvy mohou vést k odlišným závěrům. Uživatel se může na prvek dívat, ale nepoužít ho. Může prvek použít, ale neporozumět mu. Může splnit úlohu, ale s vysokou námahou. Může hodnotit aplikaci pozitivně, ale přesto během práce narážet na konkrétní bariéry. Pouze propojení více typů dat umožnilo tyto situace rozlišit.

Zároveň je nutné diskutovat **omezení této práce**. Přestože bylo realizováno pět případových studií, nelze výsledky chápat jako univerzální pravidla platná pro všechny interaktivní kartografické vizualizace. Hodnocené produkty reprezentovaly pouze **vybrané typy aplikací**. Jde o záměrně pestrý, **nikoliv statisticky reprezentativní soubor**. Síla práce spočívá v **metodologické gradaci** a v šíři ověřených situací, nikoliv v možnosti zobecnit výsledky na celou populaci mapových aplikací. Podobně ani soubory participantů nelze považovat za plně reprezentativní pro všechny uživatelské skupiny. V některých studiích převažovali studenti, mladší uživatelé nebo osoby s vyšší digitální kompetencí. To je v akademických eye-tracking experimentech běžné, ale omezuje to možnost přímého zobecnění na starší uživatele, osoby s nižší digitální gramotností, specifické profesní skupiny nebo uživatele se zrakovým či motorickým omezením.

Dalším omezením byla **laboratorní povaha** většiny experimentů. Laboratorní prostředí umožnilo kontrolovaný sběr dat, kvalitní kalibraci a standardizaci podmínek, ale současně se lišilo od přirozeného používání mapových aplikací. Uživatel v laboratoři plní zadané úlohy, pracuje pod dohledem moderátora a ví, že je testován. V reálném prostředí může s mapou pracovat kratší dobu, s jinou motivací, na jiném zařízení, s rušivými vlivy a bez jasně definovaného cíle. Výsledky proto nelze interpretovat jako přesný obraz běžného každodenního chování, ale jako **kontrolovanou diagnostiku** interakčních bariér. Tato diagnostika je pro formativní hodnocení velmi cenná, avšak měla by být v budoucnu doplňována o terénní, vzdálené nebo dlouhodobější studie.

S omezeními souvisí také **charakter použitých úloh**. Řízené úlohy byly nezbytné pro srovnatelnost výsledků, ale zároveň mohly ovlivnit způsob práce participantů. Uživatelé se v experimentu často zaměřují na nalezení správné odpovědi, zatímco v přirozeném používání mohou mapu procházet explorativněji, méně systematicky nebo naopak s vlastní odbornou

motivací. **Otevřené explorační úlohy** tento problém částečně zmírnil, ale zcela jej neodstranily. Výsledky případových studií proto nejlépe vypovídají o tom, jak hodnocené aplikace podporovaly konkrétní typy úloh v kontrolovaném kontextu, nikoliv o všech možných způsobech jejich budoucího používání.

Významným technickým omezením byla **dostupnost a funkčnost analytických nástrojů**. Přestože současné eye-tracking platformy poskytují řadu možností pro práci se statickými obrázky, videi nebo webovými stimuly, jejich použitelnost pro dynamické interaktivní mapy je stále omezená. Problém spočívá zejména v tom, že běžná eye-tracking data jsou primárně zaznamenána v souřadnicích obrazovky. U statického stimulu je tato informace dostačující, protože obrazový bod odpovídá stejnému objektu po celou dobu experimentu. U interaktivní mapy však tentýž bod obrazovky může v různých časech odpovídat jinému geografickému území, jiné vrstvě, jinému měřítku nebo jinému prvku rozhraní. Pokud není současně zaznamenán stav aplikace, nelze eye-tracking data plnohodnotně interpretovat. Toto omezení se projevilo v PS2, PS3 i PS4 a bylo jedním z hlavních důvodů, proč bylo v závěrečném metodologickém schématu zdůrazněno propojení eye-tracking s interakčními logy a stavovými informacemi.

Důležitou otázkou je také **vztah mezi použitelností a uživatelskou zkušeností**. V práci byly využity metriky vycházející z tradičního rámce ISO, tedy účinnost, efektivnost a spokojenost, ale zároveň se opakovaně ukázalo, že u moderních mapových aplikací je vhodné uvažovat šířeji. Historický mapový srovnávač byl vnímán jako atraktivní a inovativní, což mohlo posílit ochotu uživatelů aplikaci používat i přes dílčí interakční problémy. Naopak 3D-Geo-Vis umožnil splnit většinu úloh, ale subjektivní zkušenost byla omezena výkonem, rychlostí a komplexitou prostředí. To nám ukazuje, že použitelnost a UX nejsou zaměnitelné pojmy, ale komplementární perspektivy. Půžitelnost se ptá, zda uživatel dosáhl cíle účinně a efektivně. Uživatelská zkušenost doplňuje, jak se při tom cítil, zda systému důvěřoval, zda jej považoval za přehledný, atraktivní, motivující a hodný opětovného použití. U veřejně dostupných interaktivních map je tato širší perspektiva zásadní v tom, že aplikace, která je formálně funkční, nemusí být dlouhodobě přijata uživateli.

S tím souvisí také širší otázka **standardizace subjektivního hodnocení** v kartografických uživatelských studiích. Systematické zmapování literatury v rámci DC1 ukázalo, že standardizované dotazníky nejsou ve studiích zaměřených na hodnocení IKV používány příliš často. Přestože se v oblasti HCI a UX jedná o běžnou součást hodnoticího instrumentária, v kartografických studiích stále převládají vlastní dotazníky, ad hoc škály nebo nejednotně formulované otázky. Právě tato metodologická nejednotnost byla jedním z důvodů, proč byl v několika případových studiích této práce použit dotazník UEQ. Jeho výhodou je dostupnost, relativní jednoduchost administrace, standardizovaná struktura, rozlišení pragmatické a hédonické kvality a možnost srovnání výsledků s existujícím benchmarkem. Současný benchmark UEQ však zahrnuje různé typy digitálních produktů a není specificky zaměřen na kartografické nebo geovizualizační aplikace. Pokud by byl UEQ v budoucnu systematicky využíván ve větším počtu **studií webových map**, interaktivních atlasů, mapových portálů a 3D geovizualizací, bylo by možné postupně vytvořit **referenční kartografický benchmark**. Ten by umožnil porovnávat výsledky jednotlivých studií nejen s obecnými digitálními produkty, ale přímo s výsledky jiných kartografických aplikací. Takový benchmark by mohl významně posílit srovnatelnost výzkumu, zpřesnit interpretaci uživatelské zkušenosti

a přispět ke standardizaci evaluačních postupů v kartografii. V současnosti však jeho vytvoření naráží právě na nízkou míru používání standardizovaných dotazníků v kartografických studiích. Z tohoto důvodu lze považovat širší propagaci a opakované používání UEQ nebo obdobných standardizovaných nástrojů v kartografické komunitě za žádoucí směr dalšího vývoje uživatelského hodnocení interaktivních map.

Práce rovněž ukázala, že hodnocení IKV má **dvojitý charakter**. Na jedné straně jde o hodnocení konkrétního produktu, jeho rozhraní, funkcí, nedostatků a návrhových doporučení. Na straně druhé jde o metodologický výzkum, který zjišťuje, jaké metody jsou pro takové hodnocení vůbec použitelné. Tato dvojitá povaha byla patrná ve všech případových studiích. PS1 přinesla doporučení pro interaktivní mapy v datové žurnalistice, ale zároveň ukázala limity interpretace eye-tracking dat bez interakčních logů. PS2 přinesla doporučení pro historický mapový srovnávač, ale zároveň ukázala diagnostickou hodnotu kombinace UEQ, eye-tracking záznamů a URL stavů. PS3 byla především metodologickou studií převodu dynamického a atlasového používání do analyzovatelné podoby. PS4 ukázala význam logování interakcí pro srovnání zařízení. PS5 propojila všechny hlavní vrstvy hodnocení a ukázala, že komplexní interaktivní 3D aplikace vyžaduje kombinaci behaviorálních, vizuálních a subjektivních dat. Tato dvojitá povaha je podle autorova názoru jedním z hlavních přínosů práce, protože odpovídá reálné situaci ve výzkumu interaktivních map: při testování konkrétní aplikace se zároveň ověřuje vhodnost metod, které k jejímu hodnocení používáme.

Přestože byly výsledky případových studií konkrétní a aplikačně zaměřené, jejich obecnější význam spočívá v opakujících se principech:

- ↳ Prvním principem je nutnost explicitně **signalizovat interaktivitu**. Pokud uživatel nepozná, že prvek lze použít, pak daná funkce z hlediska použitelnosti fakticky neexistuje.
- ↳ Druhým principem je potřeba **jasné zpětné vazby** systému. Uživatel musí rozumět tomu, zda se akce provedla, zda se data načítají, zda pro danou oblast nejsou dostupná, nebo zda je třeba provést další krok.
- ↳ Třetím principem je **minimalizace nadbytečné kognitivní zátěže**. Interaktivní mapa může být datově i analyticky komplexní, ale rozhraní by nemělo přidávat další zátěž nejasnou terminologií, nevhodným seskupením funkcí nebo slabě viditelnými ovládacími prvky.
- ↳ Čtvrtým principem je **respektování zařízení** a kontextu použití. Stejná mapa na počítači a mobilním telefonu není stejný uživatelský systém, protože mění přehled, vstupní modalitu i strategii práce.
- ↳ Pátým principem je potřeba **analyzovat nejen výsledek, ale proces**. Právě procesní data, tedy sekvence fixací, interakce, časové průběhy a kvalitativní projevy nejistoty, odhalují problémy, které se v konečné odpovědi nebo dotazníkovém skóre nemusí projevit.

Z hlediska metodologické opatrnosti je nutné zdůraznit, že eye-tracking by neměl být v kartografickém výzkumu prezentován jako metoda, která automaticky odhaluje kognitivní procesy. Eye-tracking měří oční pohyby a z nich lze opatrně usuzovat na vizuální pozornost. Kognitivní interpretace je vždy zprostředkována a vyžaduje oporu v experimentálním kontextu. Tato práce proto ukázala **užitečnost eye-tracking metody** zejména jako **diagnostického a komplementárního nástroje**. V kombinaci s logy a verbalizací umožnil

identifikovat přehlédnuté prvky, neefektivní strategie, místa nejistoty nebo situace, kdy uživatel sice viděl relevantní informaci, ale nevyvodil z ní správný závěr. Samostatně by však eye-tracking v mnoha případech **vedl k neúplné nebo přehnané interpretaci**. Tento závěr je důležitý i pro budoucí výzkumníky, protože technická atraktivita eye-tracking technologie může svádět k tomu, že fixace a heatmapy jsou prezentovány jako přímý důkaz porozumění; nicméně výsledky této práce ukázaly, že taková interpretace by byla metodologicky problematická.

Zde se otevírá jeden z nejdůležitějších **směrů dalšího vývoje**. Pro hodnocení použitelnosti interaktivních map by bylo velmi přínosné, kdyby existoval nástroj schopný automaticky vytvářet AOI na základě skutečných prvků aplikace. Princip by mohl být podobný tomu, jak webový prohlížeč v režimu pro vývojáře dokáže při pohybu kurzoru zvýrazňovat HTML elementy, protože zná jejich pozici, strukturu a identifikátor v DOM. Analogicky by bylo možné u interaktivní mapy sledovat, zda se bod pohledu protíná s konkrétním prvkem rozhraní nebo mapovým objektem. Pokud by bod pohledu dopadl na tlačítko, legendu, měřítko, postranní panel, pop-up, název vrstvy nebo konkrétní kartografický znak, systém by tento prvek automaticky evidoval jako **sémantickou AOI**. V ideálním případě by tedy výzkumník nemusel ručně kreslit AOI nad screenshotem nebo videem, ale pracoval by s automaticky generovanou časovou sekvencí typu: participant se díval na legendu, poté na mapové pole, poté na konkrétní prvek vrstvy, poté na ovládací tlačítko a následně provedl interakci.

Takový nástroj by mohl významně snížit pracnost eye-tracking analýzy a zároveň zvýšit přesnost interpretace. U webových map existuje pro tento přístup logický základ, protože mnoho prvků rozhraní je v aplikaci již definováno jako HTML, SVG, canvas nebo WebGL objekt. Sidebar, tlačítka, přepínače vrstev, měřítko, legenda a další prvky mají typicky definovanou pozici a identitu v kódu. U vektorových mapových prvků by bylo možné využít informace o vrstvě, feature ID, geometrii, stylu a aktuálním měřítku. U knihoven typu Leaflet, OpenLayers, Mapbox GL, ArcGIS Maps SDK nebo Cesium by nástroj mohl kombinovat obrazové souřadnice pohledu s funkcemi pro hit-testing, dotazování vykreslených prvků nebo převod obrazových souřadnic do geografického prostoru. V jednodušší podobě by stačilo automaticky určovat, zda bod pohledu ležel v mapovém poli, legendě, panelu vrstev nebo v konkrétním ovládacím prvku. V pokročilejší podobě by bylo možné určit i konkrétní mapový znak nebo geografický objekt, pokud byl v daném okamžiku vykreslen a identifikovatelný.

Tento princip by se blížil možnostem některých moderních webových a vzdálených testovacích řešení, například přístupům založeným na instrumentaci HTML rozhraní, podobně jak u RealEye SDK. Z hlediska kartografie by však bylo nutné jít dále než u běžné webové stránky, protože mapa není pouze sada statických elementů. Je to prostorově referencované, komplexní a dynamicky transformované prostředí. **Automatická AOI** by proto musela ukládat nejen název elementu, ale také čas, měřítko, souřadnicový rozsah mapy, aktivní vrstvy, stav filtrů, případně aktuální kameru u 3D scény. U 2D map by šlo o propojení souřadnic pohledu, obrazového bodu a geografické souřadnice. U 3D aplikací by bylo nutné uvažovat ray-casting z pohledu kamery do scény, práci s překryvy a viditelností objektů. Technicky by tedy nešlo o triviální úlohu, ale z hlediska výzkumné praxe by právě takové řešení představovalo pravděpodobně nejpřímější cestu k výraznému zjednodušení analýzy interaktivních map.

Je však nutné dodat, že automatické AOI by nevyřešily všechny interpretační problémy. Především by stále platilo, že **pohled na prvek neznamená jeho pochopení**. Nástroj by mohl

spolehlivěji určit, že se participant díval na konkrétní ovládací prvek nebo kartografický objekt, ale nikoliv proč se na něj díval a jak jej interpretoval. Zůstala by také otázka přesnosti eye-trackeru, velikosti a hustoty mapových prvků, překryvu objektů, krátkých fixací, periferního vidění a toho, jak definovat minimální dobu pohledu potřebnou pro zařazení prvku do AOI. U velmi malých znaků nebo hustých tematických vrstev by mohlo docházet k nejednoznačným přiřazením. U rastrových dlaždic by systém bez dodatečné sémantické vrstvy věděl pouze to, na kterou část obrazu se uživatel díval, nikoliv jaký objekt byl zobrazen. Přesto by takový přístup zásadně posunul možnosti analýzy, protože by nahradil ruční a často subjektivní anotaci alespoň částečně automatizovanou vazbou mezi pohledem, rozhraním a stavem mapy.

Z hlediska budoucího výzkumu by proto bylo vhodné usilovat o **vývoj otevřeného nástroje** nebo **metodické knihovny**, která by propojila eye-tracking data s interakčními logy a strukturou webové mapové aplikace. Takový nástroj by mohl fungovat jako rozšíření MapLogger nástroje nebo jako samostatná komponenta integrovatelná do běžných mapových frameworků. Jeho úkolem by bylo synchronizovat čas eye-trackeru, čas webové aplikace a stav mapy, převádět body pohledu na sémantické prvky a exportovat data ve formátu vhodném pro následnou analýzu. Výstupem by nebyla pouze tabulka fixací, ale časová osa uživatelského chování zahrnující pohled, interakci, stav rozhraní a identitu mapových objektů. Právě tento typ propojení by mohl odstranit jednu z největších překážek, která se v této disertační práci opakovaně objevila: vysokou pracnost a omezenou opakovatelnost ruční AOI analýzy.

Dalším důležitým směrem je **rozšíření výzkumu mimo stacionární eye-tracking zařízení**. Metodologické schéma ve výsledcích této práce bylo záměrně zaměřeno na stacionární eye-tracker a dynamické 2D interaktivní kartografické vizualizace, protože právě v této oblasti měla práce **nejsilnější empirickou oporu**. To však neznamená, že například mobilní eye-tracking, webcam-based eye-tracking a jiné jsou méně důležité. Naopak, systematické mapování ukázalo, že výzkum směřuje k širšímu ekosystému uživatelské analytiky, v němž eye-tracking nebude izolovanou metodou, ale součástí multimodálního záznamu chování. V budoucnu bude nutné řešit, jak propojit eye-tracking data z různých typů zařízení, jak hodnotit mapy v terénu, jak pracovat s proměnlivým osvětlením, pohybem hlavy, mobilním kontextem a reálnou navigací. Tato práce k tomu poskytla **metodologický základ**.

Závěrem lze konstatovat, že disertační práce **přispěla k aktuální debatě** o hodnocení IKV tím, že propojila systematické zmapování stavu poznání, výběr a syntézu metod a empirické ověření v pěti případových studiích. Její výsledky podporují posun **od izolovaného používání** eye-tracking metrik **ke komplexnímu hodnocení** mapových rozhraní jako dynamických interakčních systémů. Metodologické schéma představené ve výsledcích by proto mělo být chápáno jako praktická syntéza zkušeností, nikoliv jako definitivní univerzální model. Jeho hodnota spočívá v tom, že ukazuje, které datové vrstvy je vhodné kombinovat. Budoucí výzkum by měl tento rámec dále rozšiřovat zejména směrem k automatizované tvorbě sémantických AOI, hlubší integraci eye-tracking dat s interakčními logy, terénnímu a mobilnímu testování, standardizovanějšímu reportování metrik a větší diverzitě uživatelských skupin. Právě v těchto směrech lze očekávat další posun od náročné ruční analýzy jednotlivých záznamů k robustnějším, opakovatelnějším a ekologicky validnějším metodám hodnocení interaktivních kartografických vizualizací.

ZÁVĚR (SUMMARY)

10 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývala **hodnocením použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking**. Hlavním cílem práce bylo zhodnotit použitelnost vybraných interaktivních kartografických produktů a současně navrhnout metodologicky ukotvený postup, jak tyto produkty hodnotit s využitím metody eye-tracking a doplňkových metod. Tento cíl byl naplněn prostřednictvím tří dílčích cílů, které na sebe postupně navazovaly. Nejprve bylo provedeno systematické zmapování stávajícího výzkumu, následně byl sestaven a kriticky zhodnocen soubor vhodných metod a nástrojů a v závěrečné empirické části byla realizována sada pěti případových studií zaměřených na různé typy interaktivních kartografických vizualizací.

Systematické mapování literatury ukázalo, že eye-tracking je v kartografii etablovanou metodou, avšak jeho využití při hodnocení interaktivních geovizualizací je metodologicky značně roztržité. V rámci rešeršní části bylo identifikováno 87 relevantních studií, které prokázaly dominanci výzkumu zaměřeného na interaktivní 2D mapy, fixační metriky, AOI analýzu a vyhledávací či analytické úlohy. Současně se ukázalo, že studie často postrádají standardizované metriky použitelnosti, pracují s menšími a relativně homogenními vzorky participantů a obtížně řeší dynamiku interaktivních stimulů. Tento poznatek vytvořil základ pro další části práce, protože potvrdil potřebu metodologického rámce, který nebude chápat eye-tracking izolovaně, ale jako součást širšího hodnoticího systému.

V části zaměřené na **výběr a syntézu metod** bylo ukázáno, že pro hodnocení interaktivních kartografických vizualizací nestačí jediný nástroj ani jediný typ dat. Eye-tracking poskytuje detailní informaci o vizuální pozornosti, ale sám o sobě nevysvětluje motivaci, porozumění ani rozhodovací procesy uživatele. Proto bylo nutné jej kombinovat s dalšími přístupy, zejména s logováním uživatelských interakcí, metrikami účinnosti a efektivnosti, standardizovanými dotazníky, verbalizačními metodami a kvalitativní inspekci záznamů. Tato syntéza vedla k vytvoření metodologického schématu, které bylo následně empiricky ověřováno a zpřesňováno v případových studiích.

Pět realizovaných případových studií ukázalo, že s rostoucí mírou dynamiky a interaktivity mapového prostředí se snižuje použitelnost tradičních postupů převzatých ze statických eye-tracking experimentů. V případě interaktivních map v datové žurnalistice bylo možné využít klasickou AOI analýzu nad screenshoty, protože stimuly byly relativně stabilní. Přesto se ukázalo, že hlavní bariérou byla objevitelnost interakcí a slabá integrace map do narativního prostředí článku. U historického mapového srovnávače se jako zásadní ukázala kombinace eye-tracking, UEQ a interakčních logů, která umožnila propojit pozitivní subjektivní hodnocení aplikace s konkrétními pozorovanými problémy při práci s rozhraním. Případová studie statického a interaktivního atlasu prokázala, že analýza dynamických mapových stimulů vyžaduje zvláštní postupy pro převod a mapování fixací, přičemž významným výsledkem bylo také zhodnocení náročnosti těchto analytických postupů. Studie zaměřená na počítačové a mobilní prostředí potvrdila, že zařízení ovlivňuje zejména strukturu interakcí a strategii práce s mapou, nikoliv nutně samotnou správnost odpovědí. Závěrečná studie aplikace 3D-Geo-Vis ukázala, že u komplexních 3D geovizualizací je použitelnost ovlivněna nejen

návrhem rozhraní, ale také výkonem aplikace, rychlostí odezvy, viditelností ovládacích prvků a kognitivní náročností práce v trojrozměrném prostředí.

Hlavním metodologickým výsledkem disertační práce je upravené **metodologické schéma** pro analýzu dat dynamických 2D interaktivních kartografických vizualizací při použití stacionárního eye-trackeru. Toto schéma nevzniklo pouze jako teoretický přehled metod, ale jako syntéza poznatků z literatury, praktických zkušeností s analytickými nástroji a empirických zjištění z případových studií. Jeho význam spočívá v tom, že ukazuje, jak lze kombinovat analýzu eye-tracking dat, metriky použitelnosti, logování interakcí, verbalizační metody, dotazníky a další doplňkové přístupy. Schéma může sloužit jako inspirace pro další výzkumníky při návrhu experimentů s interaktivními mapami, zejména v situacích, kdy se mění mapový obsah, měřítko, vrstvy nebo stav uživatelského rozhraní.

Výsledky práce zároveň prokázaly, že použitelnost interaktivní kartografické vizualizace nelze spolehlivě hodnotit pouze podle toho, zda uživatel našel správnou odpověď, ani pouze podle toho, kam se díval. Spolehlivější interpretace vzniká až propojením více datových vrstev: vizuální pozornosti, interakčního chování, času řešení, úspěšnosti, subjektivního hodnocení a kvalitativního pozorování. Eye-tracking se tak ukázal jako velmi cenná, ale interpretačně citlivá metoda. Jeho největší přínos spočívá v diagnostice vizuální pozornosti, identifikaci přehlížených prvků, sledování strategií a odhalování problémových míst rozhraní. Plnou výpovědní hodnotu však získává až ve spojení s dalšími metodami.

Disertační práce tak přinesla **dva typy výsledků**. V **aplikační rovině** byly zhodnoceny konkrétní interaktivní kartografické produkty a byla formulována doporučení pro jejich zlepšení. V **metodologické rovině** byl vytvořen, ověřen a zpřesněn postup pro hodnocení interaktivních kartografických vizualizací, který reflektuje specifika dynamických mapových rozhraní. Práce tím přispěla k rozvoji kognitivní kartografie, HCI a uživatelsky zaměřeného hodnocení mapových aplikací. Současně ukázala, že budoucí výzkum by měl směřovat k hlubší integraci eye-tracking dat s interakčními logy, k automatizované tvorbě sémantických AOI, k lepší práci se stavem webových mapových aplikací a k rozšíření testování mimo laboratorní prostředí. Hlavní cíl disertační práce byl naplněn a výsledky poskytují empiricky podložený rámec pro další výzkum i praktické hodnocení interaktivních kartografických vizualizací.

11 SUMMARY

The dissertation dealt with the usability evaluation of interactive cartographic visualisations by means of eye-tracking. The main aim of the thesis was to evaluate the usability of selected interactive cartographic products and, at the same time, to propose a methodologically grounded procedure for evaluating these products using eye-tracking and complementary methods. This aim was fulfilled through three interrelated sub-objectives. First, the existing research was systematically mapped; second, a set of suitable methods and tools was selected and critically assessed; and third, a set of five empirical case studies was conducted, focusing on different types of interactive cartographic visualisations.

The systematic mapping of the literature showed that eye-tracking is an established method in cartography, but its application to the usability evaluation of interactive geovisualisations remains methodologically fragmented. The review identified 87 relevant studies, which demonstrated the dominance of research focused on interactive 2D maps, fixation-based metrics, AOI analysis, and search or analytical tasks. At the same time, the studies often lacked standardised usability metrics, relied on smaller and relatively homogeneous participant samples, and struggled with the dynamic nature of interactive stimuli. This finding provided the basis for the subsequent parts of the dissertation, as it confirmed the need for a methodological framework that would not treat eye-tracking as an isolated method, but rather as part of a broader evaluation system.

The section focused on the selection and synthesis of methods showed that neither a single tool nor a single type of data is sufficient for evaluating interactive cartographic visualisations. Eye-tracking provides detailed information about visual attention, but by itself it does not explain the user's motivation, understanding, or decision-making processes. It therefore had to be combined with other approaches, particularly interaction logging, effectiveness and efficiency metrics, standardised questionnaires, verbalisation methods, and qualitative inspection of recordings. This synthesis led to the development of a methodological scheme, which was subsequently empirically tested and refined in the case studies.

The five conducted case studies showed that, as the level of dynamism and interactivity of the map environment increases, the applicability of traditional procedures derived from static eye-tracking experiments decreases. In the case of interactive maps in data journalism, classical AOI analysis based on screenshots could still be used, because the stimuli were relatively stable. Nevertheless, the main barriers were the discoverability of interactions and the weak integration of maps into the narrative environment of the article. In the historical map comparison application, the combination of eye-tracking, the UEQ, and interaction logs proved essential, as it made it possible to connect the positive subjective evaluation of the application with specific observed problems in the interface. The case study comparing a static and an interactive atlas demonstrated that the analysis of dynamic map stimuli requires specific procedures for transferring and mapping fixations, while an important result was also the assessment of the workload associated with these analytical procedures. The study focused on desktop and mobile environments confirmed that the device primarily affects the structure of interactions and the strategy of map use, rather than necessarily affecting the correctness of answers. The final study of the 3D-Geo-Vis application showed that, in complex 3D geovisualisations, usability is influenced not only by interface design, but also by

application performance, response speed, the visibility of controls, and the cognitive demands of working in a three-dimensional environment.

The main methodological result of the dissertation is a revised methodological scheme for analysing data from dynamic 2D interactive cartographic visualisations when using a stationary eye-tracker. This scheme was not created merely as a theoretical overview of methods, but as a synthesis of findings from the literature, practical experience with analytical tools, and empirical findings from the case studies. Its significance lies in showing how eye-tracking data analysis, usability metrics, interaction logging, verbalisation methods, questionnaires, and other complementary approaches can be combined. The scheme can serve as an inspiration for other researchers designing experiments with interactive maps, especially in situations where map content, scale, layers, or the state of the user interface change during use.

The results also demonstrated that the usability of an interactive cartographic visualisation cannot be reliably assessed solely by whether the user found the correct answer, nor solely by where the user looked. A more reliable interpretation emerges only by connecting multiple data layers: visual attention, interaction behaviour, task completion time, success, subjective evaluation, and qualitative observation. Eye-tracking therefore proved to be a highly valuable but interpretatively sensitive method. Its greatest contribution lies in diagnosing visual attention, identifying overlooked elements, observing user strategies, and detecting problematic parts of the interface. However, it gains its full explanatory value only when combined with other methods.

The dissertation therefore produced two types of results. At the applied level, specific interactive cartographic products were evaluated and recommendations for their improvement were formulated. At the methodological level, a procedure for evaluating interactive cartographic visualisations was created, tested, and refined, reflecting the specific characteristics of dynamic map interfaces. The thesis thus contributed to the development of cognitive cartography, HCI, and user-centred evaluation of map applications. At the same time, it showed that future research should move towards deeper integration of eye-tracking data with interaction logs, automated creation of semantic AOIs, improved handling of the state of web mapping applications, and the extension of testing beyond laboratory settings. The main aim of the dissertation was fulfilled, and the results provide an empirically grounded framework for further research and practical evaluation of interactive cartographic visualisations.

BIBLIOGRAFIE

12 BIBLIOGRAFIE

- AHRENS, M. (2020) Published Towards Automatic Capturing of Traceability Links by Combining Eye Tracking and Interaction Data. In *Proceedings of the 2020 IEEE 28th International Requirements Engineering Conference (RE)*, 31 Aug.-4 Sept. 2020 2020, s. 434-439.
- ALAÇAM, Ö., DALCI, M. (2009) Published A Usability Study of WebMaps with Eye Tracking Tool: The Effects of Iconic Representation of Information. In *Proceedings of the Human-Computer Interaction. New Trends*, Berlin, Heidelberg, J.A. JACKO ed. Springer Berlin Heidelberg, 2009// 2009, s. 12-21.
- ALAM, S. S., JIANU, R. (2017) Analyzing Eye-Tracking Information in Visualization and Data Space: From Where on the Screen to What on the Screen. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(5), s. 1492-1505.
- ALEM DAG, E., CAGILTAY, K. (2018) A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 2018/10/01/, 125, s. 413-428.
- ALMAHMOUD, J., ALBEAIK, S., ALRASHED, T., ALMALKI, A. (2017) Published Visual Exploration Patterns in Information Visualizations: Insights from Eye Tracking. In *Proceedings of the 9th International Conference on Social Computing and Social Media (SCSM) Held as Part of 19th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International)*, Vancouver, CANADA, CHAM: Springer International Publishing Ag, Jul 09-14 2017, s. 357-366.
- ALROOBAAE, R., MAYHEW, P. J. (2014) Published How many participants are really enough for usability studies? In *Proceedings of the 2014 Science and Information Conference*, 27-29 Aug. 2014 2014, s. 48-56.
- AMORIM, F., PUGLIESI, E. (2021) STATIC AND DYNAMIC FLOW MAPS: COMPARING THE USABILITY BETWEEN IMPAIRED COLOR VISION AND NORMAL COLOR VISION. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 11/15, 27, s. 1.
- ANAGNOSTOPOULOS, V., HAVLENA, M., KIEFER, P., GIANNPOULOS, I., SCHINDLER, K., RAUBAL, M. (2017) Gaze-Informed location-based services. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(9), s. 1770-1797.
- ANDERSON, C. (2020) Animated Maps [online]. The Pennsylvania State University GEOG 486: Cartography and Visualization. Dostupné na: <https://www.e-education.psu.edu/geog486/node/720>.
- ANDERSON, L. W., KRATHWOHL, D. R. (2001) A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives. New York Longman.
- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G. (2006) Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data: A Systematic Approach. Springer Berlin, Heidelberg.
- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G., VOSS, H., BERNARDO, F., HIPOLITO, J., KRETCHMER, U. (2002) Testing the Usability of Interactive Maps in CommonGIS. *Cartography and Geographic Information Science*, 2002/01/01, 29(4), s. 325-342.
- ASAN, O., YANG, Y. (2015) Using Eye Trackers for Usability Evaluation of Health Information Technology: A Systematic Literature Review. *JMIR Human Factors*, 2(1), s. e5.
- AVIZ, I. L., SOUZA, K. E., RIBEIRO, E., DE MELLO, H., SERUFFO, M. C. D. R. (2019) Published Comparative study of user experience evaluation techniques based on mouse and gaze tracking. In *Proceedings of the Proceedings of the 25th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web, WebMedia 2019*, Association for Computing Machinery, Inc, 2019, s. 53-56.
- BANDROVA, T., NIKOLOVA, V. (2005) Gender Comparison of Understanding and Information Extraction from School Atlases in Bulgarian Schools 01/01, s.
- BARCELOS, A., MONIZ, A., HENRIQUES, A. R., MAZEDA, C., FRAZÃO MATEUS, E., MACHADO, A., C. F. G., MORETO, M., M. F. A., MENDONÇA, N., COSTA, D., M. M. M., DOMINGOS, P., NESME, Y., CANHÃO, H., DIAS, S., RODRIGUES, A. M. (2025) Usability and User Experience of a Digital Platform Prototype (Healthy Bone) to Promote Pharmacological and Nonpharmacological Treatment in Patients With Osteoporosis: Mixed Methods Study. *JMIR Form Res*, Nov 7, 9, s. e72468.
- BARGAS-AVILA, J., HORNBAEK, K. (2011) Old wine in new bottles or novel challenges? A critical analysis of empirical studies of User Experience. 2689-2698 s.
- BARTLING, M., RESCH, B., EITZINGER, A., ZURITA-ARTHOS, L. (2019) A multi-national human-computer interaction evaluation of the public participatory GIS GeoCitizen. *GI Forum*, 7(1), s. 18-39.
- BARTLING, M., RESCH, B., TRÖSTERER, S., EITZINGER, A. (2021) Evaluating PPGIS Usability in a Multi-National Field Study Combining Qualitative Surveys and Eye-Tracking. *Cartographic Journal*, Apr, 58(2), s. 167-182.
- BEITLOVA, M. (2021) POROVNÁNÍ ČTENÍ MAP ŠKOLNÍHO ATLASU UČITELEM A JEHO ŽÁKEM. Olomouc, dissertation. Palacký University s. 202.
- BEITLOVA, M., GARTNER, G., VANICEK, T., VOJTECHOVSKA, M., JOUKL, Z., POPELKA, S. (2024) Exploring Methods for Revealing the Cognitive Structures of Map Information Extraction. *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 7, s. 11.
- BEITLOVA, M., POPELKA, S., VOZENILEK, V. (2020) Differences in Thematic Map Reading by Students and Their Geography Teacher. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), s. 492.
- BEKELE, M. K. (2019) Walkable Mixed Reality Map as interaction interface for Virtual Heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15, s.
- BEVAN, N. (2009) Published What is the difference between the purpose of usability and user experience evaluation methods. In *Proceedings of*, 2009, s.
- BIANCONI, F., FILIPPUCI, M., CORNACCHINI, F., SECCARONI, M. (2022) Published IMMERSIVE VISUAL EXPERIENCE FOR WAYFINDING ANALYSIS. In *Proceedings of the 9th International Workshop on 3D-ARCH 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, Mantua, ITALY, GOTTINGEN: Copernicus Gesellschaft MbH, Mar 02-04 2022, s. 89-96.
- BIEDERT, R., BUSCHER, G., DENGEL, A. (2010) The eyeBook – Using Eye Tracking to Enhance the Reading Experience. *Informatik-Spektrum*, 2010/06/01, 33(3), s. 272-281.
- BLÁHA, D. (2015) Vliv kognitivní zátěže na použitelnost uživatelských rozhraní vybraných internetových bankovníctví. Filozofická fakulta, Brno, Masarykova univerzita s.
- BLÁHA, J. D. (2010) Various Ways of Assessment of Cartographic Works. In G. GARTNER, F. ORTAG eds. *Cartography in Central and Eastern Europe: CEE 2009*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 211-229.
- BLASCHECK, T., JOHN, M., KOCH, S., BRÜDER, L., ERTL, T. (2016a) Published Triangulating user behavior using eye movement, interaction, and think aloud data. In *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*, S.N. SPENCER ed. Association for Computing Machinery, 2016a, s. 175-182.
- BLASCHECK, T., JOHN, M., KURZHALS, K., KOCH, S., ERTL, T. (2016b) VA2: A Visual Analytics Approach for // Evaluating Visual Analytics Applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(1), s. 61-70.
- BLASCHECK, T., KURZHALS, K., RASCHKE, M., BURCH, M., WEISKOPF, D., ERTL, T. (2014) State-of-the-Art of Visualization for Eye Tracking Data. In *Proceedings of the Eurographics Conference on Visualization (EuroVis)*, Swansea, Wales, UK, R.B.R.M.I. VIOLA ed., The Eurographics Association, s. 20.

- BLASCHECK, T., KURZHALS, K., RASCHKE, M., BURCH, M., WEISKOPF, D., ERTL, T. (2017) Visualization of Eye Tracking Data: A Taxonomy and Survey. *Computer Graphics Forum*, 36(8), s. 260-284.
- BOHMAN, A., NESET, T.-S., OPACH, T., RØD, J. K. (2015) Decision support for adaptive action – assessing the potential of geographic visualization. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2015/12/02, 58(12), s. 2193-2211.
- BOJKO, A. (2013) *Eye Tracking the User Experience: A Practical Guide to Research*. Rosenfeld Media, 320 s.
- BRADY, D., FERGUSON, N., ADAMS, M. (2018) Usability of MyFireWatch for non-expert users measured by eyetracking. *Australian Journal of Emergency Management*, 33(4), s. 28-34.
- BROCK, A. M., TRUILLET, P., ORIOLA, B., PICARD, D., JOUFFRAIS, C. (2015) Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People. *Human-Computer Interaction*, 2015/03/04, 30(2), s. 156-194.
- BRODERSEN, L., ANDERSEN, H. H. K., WEBER, S. (2001) Applying eye-movement tracking for the study of map perception and map design. Kbh, Denmark: Kort- og Matrikelstyrelsen, 98 s.
- BROEKHUIS, M., VAN VELSEN, L., PEUTE, L., HALIM, M., HERMENS, H. (2021) Conceptualizing Usability for the eHealth Context: Content Analysis of Usability Problems of eHealth Applications. *JMIR Form Res*, 2021/7/27, 5(7), s. e18198.
- BRYCHTOVA, A., COLTEKIN, A. (2016) An Empirical User Study for Measuring the Influence of Colour Distance and Font Size in Map Reading Using Eye Tracking. *The Cartographic Journal*, 2016/07/02, 53(3), s. 202-212.
- BUDEBERG, J., JENNY, B., WILLETT, W. (2017) Interactive shearing for terrain visualization: an expert study. *GeoInformatica*, 2017/07/01, 21(3), s. 643-665.
- BUNCH, R., LLOYD, R. (2006) The Cognitive Load of Geographic Information. *The Professional Geographer*, 04/12, 58, s. 209-220.
- BURCH, M. (2018) Published Visual analysis of eye movement data with fixation distance plots. In *Proceedings of the Smart Innovation, Systems and Technologies*, R.J. HOWLETT, L.C. JAIN, L.C. JAIN, I. CZARNOWSKI, R.J. HOWLETT, L.C. JAIN eds. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2018, s. 227-236.
- BUSWELL, G. T. (1935) *How people look at pictures: a study of the psychology and perception in art*. Oxford, England: Univ. Chicago Press, 198-198 s.
- CARTWRIGHT, W., CRAMPTON, J., GARTNER, G., MILLER, S., MITCHELL, K., SIEKIERSKA, E., WOOD, J. (2001) Geospatial Information Visualization User Interface Issues. *Cartography and Geographic Information Science - CARTOGR GEOGR INF SCI*, 01/01, 28, s. 45-60.
- CARTWRIGHT, W., PETERSON, M. P. (1999) Multimedia Cartography. In W. CARTWRIGHT, M.P. PETERSON, G. GARTNER eds. *Multimedia Cartography*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 1-10.
- ÇÖLTEKIN, A., FABRIKANT, S. I., LACAYO, M. (2010) Exploring the efficiency of users' visual analytics strategies based on sequence analysis of eye movement recordings. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010/10/11, 24(10), s. 1559-1575.
- ÇÖLTEKIN, A., HEIL, B., GARLANDINI, S., FABRIKANT, S. I. (2009) Evaluating the effectiveness of interactive map interface designs: A case study integrating usability metrics with eye-movement analysis. *Cartography and Geographic Information Science*, Jan, 36(1), s. 5-17.
- ÇÖLTEKIN, A., JANETZKO, H., FABRIKANT, S. I. *Geovisualization. Geographic Information Science*, vol., s. 9 [cit. Dostupné na WWW: <<https://doi.org/10.22224/gistbok/2018.2.6>>].
- COOPER, A., REIMANN, R. (2003) *About Face 2.0: The Essentials of Interaction Design*. Wiley, 576 s.
- CRAMPTON, J. (2002) Interactivity Types in Geographic Visualization. *Cartography and Geographic Information Science. Cartography and Geographic Information Science - CARTOGR GEOGR INF SCI*, 01/01, 29, s. 85-98.
- CRAMPTON, J. W., KRYGIER, J. (2015) An Introduction to Critical Cartography. *ACME: An International Journal for Critical Geographies*, 03/03, 4(1), s. 11-33.
- CYBULSKI, P., HORBINSKI, T. (2020) User Experience in Using Graphical User Interfaces of Web Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), s.
- DE COCK, L., VAN DE WEGHE, N., OOMS, K., SAENEN, I., VAN KETS, N., VAN WALLENDael, G., LAMBERT, P., DE MAEYER, P. (2022) Linking the cognitive load induced by route instruction types and building configuration during indoor route guidance, a usability study in VR. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(10), s. 1978-2008.
- DEGBELO, A., KRUSE, J., PFEIFFER, M. (2019) Interactive maps, productivity and user experience: A user study in the e-mobility domain. *Transactions in GIS*, 09/06, 23, s.
- DELABARRE, E. B. (1898) A Method of Recording Eye-Movements. *The American Journal of Psychology*, 9(4), s. 572-574.
- DEMŠAR, U., ÇÖLTEKIN, A. (2017) Quantifying gaze and mouse interactions on spatial visual interfaces with a new movement analytics methodology. *PLOS ONE*, 12(8), s.
- DENG, Z., CHEN, Y., YU, Q., XU, Z., YE, X. (2023) Published An Experimental Study on Web Interface Design Optimization Based on User Cognitive Load. In *Proceedings of the Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, L.C. JAIN, V.E. BALAS, Q. WU, F. SHI eds. IOS Press BV, 2023, s. 506-518.
- DÍAZ-OREIRO, I., LÓPEZ, G., QUESADA, L., GUERRERO, L. A. (2019) Standardized Questionnaires for User Experience Evaluation: A Systematic Literature Review. *Proceedings*, 31(1), s. 14.
- DIBIASE, D. (1990) Visualization in the Earth Sciences. *Earth and Mineral Sciences*, 59(2), s.
- DOBESOVA, Z. (2020) Evaluation of effective cognition for the QGIS processing modeler. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4), s.
- DODGE, R., CLINE, T. S. (1901) The angle velocity of eye movements. *Psychological Review*, 8(2), s. 145-157.
- DOLEŽALOVÁ, J., POPELKA, S. (2016) ScanGraph: A novel scanpath comparison method using graph cliques visualization. *Journal of Eye Movement Research*, 08/05, 9, s. 1-13.
- DONG, W., LIAO, H., ROTH, R. E., WANG, S. (2014a) Eye Tracking to Explore the Potential of Enhanced Imagery Basemaps in Web Mapping. *The Cartographic Journal*, 2014/11/01, 51(4), s. 313-329.
- DONG, W., LIAO, H., XU, F., LIU, Z., ZHANG, S. (2014b) Using eye tracking to evaluate the usability of animated maps. *Science China Earth Sciences*, 2014/03/01, 57(3), s. 512-522.
- DONG, W., RAN, J., WANG, J. (2012) Effectiveness and Efficiency of Map Symbols for Dynamic Geographic Information Visualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 2012/01/01, 39(2), s. 98-106.
- DONG, W., WANG, S., CHEN, Y., MENG, L. (2018) Using eye tracking to evaluate the usability of flow maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), s.
- DORMAN, M. (2020) *Introduction to Web Mapping*. New York: Chapman and Hall/CRC.
- DOUGHTY, M. (2002) Further Assessment of Gender- and Blink Pattern-Related Differences in the Spontaneous Eyeblink Activity in Primary Gaze in Young Adult Humans. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 07/01, 79, s. 439-447.
- DUCHOWSKI, A. (2007) *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer London, 334 s.
- DUCHOWSKI, A. (2013) *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media, 251 s.
- DUCHOWSKI, A. T., KREJTZ, K., KREJTZ, I., BIELE, C., NIEDZIELSKA, A., KIEFER, P., RAUBAL, M., GIANNOPOULOS, I. (2018) The Index of Pupillary Activity: Measuring Cognitive Load vis-à-vis Task Difficulty with Pupil Oscillation. In *Proceedings of the Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Montreal QC, Canada, Association for Computing Machinery, s. Paper 282.
- EBERT, C., DE NEVE, P. (2001) Surviving global software development. *IEEE Software*, 04/01, 18(2), s. 62-69.

- ENOCH, J. M. (1959) Effect of the Size of a Complex Display upon Visual Search*. *Journal of the Optical Society of America*, 1959/03/01, 49(3), s. 280-286.
- ERICSSON, K. (2006) Protocol analysis and expert thought: Concurrent verbalizations of thinking during experts' performance on representative tasks. Cambridge University Press, 223-242 s.
- FABRIKANT, S. I., HESPAÑA, S. R., HEGARTY, M. (2010) Cognitively Inspired and Perceptually Salient Graphic Displays for Efficient Spatial Inference Making. *Annals of the Association of American Geographers*, 2010/01/01, 100(1), s. 13-29.
- FAIRBAIRN, D., HEPBURN, J. (2023) Eye-tracking in map use, map user and map usability research: what are we looking for? *International Journal of Cartography*, 9(2), s. 231-254.
- FAUDZI, M. A., COB, Z. C., GHAZALI, M., OMAR, R., SHARUDIN, S. A. (2024) User interface design in mobile learning applications: Developing and evaluating a questionnaire for measuring learners' extraneous cognitive load. *Heliyon*, 2024/09/30/, 10(18), s. e37494.
- FITZPATRICK, R., HIGGINS, C. (1998) Published Usable Software and Its Attributes: A Synthesis of Software Quality, European Community Law and Human-Computer Interaction. In *Proceedings of the People and Computers XIII*, London, H. JOHNSON, L. NIGAY, C. ROAST eds. Springer London, 1998// 1998, s. 3-21.
- FUHRMANN, S., AHONEN-RAINIO, P., EDSALL, R., FABRIKANT, S., KOUA, E., TOBÓN, C., WARE, C., WILSON, S. (2005) Making Useful and Useable Geovisualization: Design and Evaluation Issues. *Exploring Geovisualization*, 12/31, s. 551-566.
- GAHEGAN, M. (1999) Four barriers to the development of effective exploratory visualisation tools for the geosciences. *International Journal of Geographical Information Science*, 06/01, 13, s. 289-309.
- GIANNOPOULOS, I., KIEFER, P., RAUBAL, M. (2015) Published Gaze nav: Gaze-based pedestrian navigation. In *Proceedings of the MobileHCI 2015 - Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, Association for Computing Machinery, Inc, 2015, s. 337-346.
- GÖBEL, F., KIEFER, P., RAUBAL, M. (2019) FeatEyeTrack: automatic matching of eye tracking data with map features on interactive maps. *GeoInformatica*, 23(4), s. 663-687.
- GOLDBERG, J., HELFMAN, J. (2011) Eye tracking for visualization evaluation: Reading values on linear versus radial graphs. *Information Visualization*, 09/22, 10, s. 182-195.
- GOLDBERG, J. H., HELFMAN, J. I. (2010) Scanpath clustering and aggregation. In *Proceedings of the Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, Austin, Texas, Association for Computing Machinery, s. 227-234.
- GOLDBERG, J. H., KOTVAL, X. P. (1999) Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1999/10/01/, 24(6), s. 631-645.
- GOLEBIEWSKA, I., OPACH, T., RØD, J. K. (2017) For your eyes only? Evaluating a coordinated and multiple views tool with a map, a parallel coordinated plot and a table using an eye-tracking approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(2), s. 237-252.
- GRIGERA, J., GARRIDO, A., RIVERO, J. M., ROSSI, G. (2017) Automatic detection of usability smells in web applications. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2017/01/01/, 97, s. 129-148.
- GRINDINGER, T. J., MURALI, V. N., TETREAU, S., DUCHOWSKI, A. T., BIRCHFIELD, S. T., ORERO, P. (2011) Published Algorithm for Discriminating Aggregate Gaze Points: Comparison with Salient Regions-Of-Interest. In *Proceedings of the Computer Vision - ACCV 2010 Workshops*, Berlin, Heidelberg, R. KOCH, F. HUANG eds. Springer Berlin Heidelberg, 2011// 2011, s. 390-399.
- GUESTIN, E. D., EIZENMAN, M. (2006) General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53(6), s. 1124-1133.
- HAKLAY, M., LI, C. (2010) Single user Environments: Desktop to Mobile. In., s. 223-243.
- HALSZKA, J., HOLMQVIST, K., GRUBER, H. (2017) Eye tracking in Educational Science: Theoretical frameworks and research agendas. *J Eye Mov Res*, Feb 4, 10(1), s.
- HAMMOUD, R. I., MULLIGAN, J. B. (2008) Introduction to Eye Monitoring. In R.I. HAMMOUD ed. *Passive Eye Monitoring: Algorithms, Applications and Experiments*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 1-19.
- HARRIS, C. M., HAINLINE, L., ABRAMOV, I., LEMERISE, E., CAMENZULI, C. (1988) The distribution of fixation durations in infants and naive adults. *Vision Res*, 28(3), s. 419-432.
- HARROWER, M. (2007) The Cognitive Limits of Animated Maps. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 42(4), s. 349-357.
- HARROWER, M. (2008) The golden age of cartography is now. *Axis Maps*, 27, s.
- HENNIG, S., VOGLER, R. (2016) User-Centred Map Applications Through Participatory Design: Experiences Gained During the 'YouthMap 5020' Project. *The Cartographic Journal*, 2016/07/02, 53(3), s. 213-229.
- HERMAN, L. (2019a) User Issues of Interactive 3D Geovisualizations. Brno, dissertation. Masaryk University s. 188.
- HERMAN, L. (2019b) 3D MOVER 2.0 - LOW-COST APPLICATION FOR USABILITY TESTING OF 3D GEOVISUALISATIONS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W17, s. 143-148.
- HERMAN, L. (2021) USER EVALUATION OF INTERACTIVE THEMATIC 3D CITY MODELS - APPLICATION OF ASYNCHRONOUS REMOTE TESTING METHOD. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, VIII-4/W2-2021, s. 13-20.
- HERMAN, L., JUŘÍK, V., STACHOŇ, Z., VRBÍK, D., RUSSNÁK, J., ŘEZNÍK, T. (2018) Evaluation of User Performance in Interactive and Static 3D Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), s. 415.
- HERMAN, L., POPELKA, S., HEJLOVA, V. (2017) Eye-tracking Analysis of Interactive 3D Geovisualization. *J Eye Mov Res*, May 31, 10(3), s.
- HERTZUM, M. (2010) Images of Usability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2010/05/28, 26(6), s. 567-600.
- HESSELS, R. S., KEMNER, C., VAN DEN BOOMEN, C., HOOGE, I. T. C. (2016) The area-of-interest problem in eyetracking research: A noise-robust solution for face and sparse stimuli. *Behavior Research Methods*, 2016/12/01, 48(4), s. 1694-1712.
- HOLMQVIST, K., NYSTRÖM, M., ANDERSSON, R., DEWHURST, R., JARODZKA, H., VAN DE WEIJER, J. (2011) *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press, 560 s.
- HORBINSKI, T., CYBULSKI, P., MEDYNSKA-GULIJ, B. (2020) Graphic Design and Button Placement for Mobile Map Applications. *Cartographic Journal*, Jul, 57(3), s. 196-208.
- HORNBAEK, K. (2006) Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2006/02/01/, 64(2), s. 79-102.
- HSIAO, S. W., PENG, P. H., TSAO, Y. C. (2021) A method for the analysis of the interaction between users and objects in 3D navigational space. *Advanced Engineering Informatics*, 50, s.
- HUJŇÁKOVÁ, P. (2018) Analýza vybraných aspektů webových map. Olomouc, Diplomová práce. Univerzita Palackého s. 77.
- HUMMEL, G., MAIER, S., BAUMGARTEN, M., EDER, C., STRUBICH, P. T., STROEBELE-BENSCHOP, N. (2021) Visual attention towards food during unplanned purchases - A pilot study using mobile eye tracking technology. *PLOS ONE*, 16(3), s. e0247755.
- HWANG, W., SALVENDY, G. (2010) Number of people required for usability evaluation: the 10±2 rule. *Commun. ACM*, 53(5), s. 130-133.
- CHARTERS, E. (2003) The use of think-aloud methods in qualitative research: an introduction to think-aloud methods. *Brock Education Journal*, 12(2), s.

- CHICAS, S. D., NIELSEN, J. Ø. (2022) Who are the actors and what are the factors that are used in models to map forest fire susceptibility? A systematic review. *Natural Hazards*, 2022/12/01, 114(3), s. 2417-2434.
- CHOI, T. H., JI, S. Y., HONG, Y. Y., JUN, H. J. (2024) Published WEB-BASED 3D HEATMAP VISUALIZATION OF SPATIAL COGNITION USING EEG AND EYE TRACKING DATA. In *Proceedings of the Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, N. GARDNER, C.M. HERR, L. WANG, H. TOSHIKI, S.A. KHAN eds. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 2024,s. 539-548.
- ICA. (2021) Definitions [online]. International Cartographic Association (ICA). Dostupné na: <https://icaci.org/mission/>.
- IRINA FABRIKANT, S., REBICH-HESPANHA, S., ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G., MONTELO, D. R. (2008) Novel Method to Measure Inference Affordance in Static Small-Multiple Map Displays Representing Dynamic Processes. *The Cartographic Journal*, 2008/08/01, 45(3), s. 201-215.
- ISO. (2001) Software Engineering – Product Quality – Part 1: Quality model. In. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO. (2018) ISO 9241-11: Ergonomics of human-system interaction—Part 11: Usability: Definitions and concepts. In. Geneva: International Organization for Standardization, s. 29.
- JACOB, R. J. K., KARN, K. S. (2003) Commentary on Section 4 - Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises. In J. HYÖNÄ, R. RADACH, H. DEUBEL eds. *The Mind's Eye*. Amsterdam: North-Holland, s. 573-605.
- JASPERS, M. W. M. (2009) A comparison of usability methods for testing interactive health technologies: Methodological aspects and empirical evidence. *International Journal of Medical Informatics*, 2009/05/01/, 78(5), s. 340-353.
- JAVAL, E. (1878) Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Optique*, 79, s. 97-117.
- JENKS, G. F. (1973) Visual integration in thematic mapping: fact or fiction? : *International Yearbook of Cartography*.
- JESDANUN, A. (2015) Apple Maps, once a laughingstock, now dominates iPhones [online]. New York NY: Associated Press. Dostupné na: <https://apnews.com/article/df90458e58564f19b4b7c8510f9baa67>.
- JOHANSSON, J., OPACH, T., GLAAS, E., NESET, T. S., NAVARRA, C., LINNÉR, B. O., RØD, J. K. (2017) VisAdapt: A Visualization Tool to Support Climate Change Adaptation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 37(2), s. 54-65.
- JUŘÍK, V., HERMAN, L., KUBÍČEK, P., STACHOŇ, Z., ŠAŠINKA, Č. (2016) COGNITIVE ASPECTS OF COLLABORATION IN 3D VIRTUAL ENVIRONMENTS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B2, s. 663-670.
- JUSTOVÁ, P., CAJTHAML, J. (2023) Cartographic Design and Processing of Originally Printed Historical Maps for Their Presentation on the Web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(6), s. 230.
- KAIL, R. (1997) Processing time, imagery, and spatial memory. *J Exp Child Psychol*, Jan, 64(1), s. 67-78.
- KESKIN, M., KETTUNEN, P. (2023) Potential of eye-tracking for interactive geovisual exploration aided by machine learning. *International Journal of Cartography*, May, 9(2), s. 150-172.
- KESKIN, M., KRASSANAKIS, V., ÇÖLTEKIN, A. (2023) Visual Attention and Recognition Differences Based on Expertise in a Map Reading and Memorability Study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1), s. 21.
- KHAJOUEI, R., FARAHAANI, F. (2020) A combination of two methods for evaluating the usability of a hospital information system. *BMC Med Inform Decis Mak*, May 4, 20(1), s. 84.
- KHALIL, M. K., PAAS, F., JOHNSON, T. E., PAYER, A. F. (2005) Design of interactive and dynamic anatomical visualizations: the implication of cognitive load theory. *Anat Rec B New Anat*, Sep, 286(1), s. 15-20.
- KIEFER, P., GIANNPOULOS, I., RAUBAL, M. (2013) Published Using eye movements to recognize activities on cartographic maps. In *Proceedings of the GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, 2013,s. 478-481.
- KIEFER, P., GIANNPOULOS, I., RAUBAL, M., DUCHOWSKI, A. (2017) Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges. *Spatial Cognition and Computation*, 17(1-2), s. 1-19.
- KIRCHER, K. *Driver distraction : a review of the literature*. Linköping, 2007. 03476030 (ISSN). Statens väg- och transportforskningsinstitut. Dostupné na WWW:<<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-6451>>.
- KITCHENHAM, B., CHARTERS, S. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. UK, 2007. Technical Report: EBSE. Dostupné na WWW:<https://legacyfileshare.elsevier.com/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf>.
- KOENIG, A., SAMARASUNDERA, E., CHENG, T. (2011) Interactive map communication: Pilot study of the visual perceptions and preferences of public health practitioners. *Public Health*, 2011/08/01/, 125(8), s. 554-560.
- KOMÁRKOVÁ, J. (2008) Kvalita webových geografických informačních systémů. Pardubice: Univerzita Pardubice, 128 s.
- KOMOGORTSEV, O., JAYARATHNA, S., KOH, D., GOWDA, S. (2010) Qualitative and Quantitative Scoring and Evaluation of the Eye Movement Classification Algorithms. *Technical Reports-Computer Science*, 03/22, s.
- KONEČNÝ, M., KUBÍČEK, P., STACHOŇ, Z., ŠAŠINKA, Č. (2011) The usability of selected base maps for crises management—users' perspectives. *Applied Geomatics*, 2011/12/01, 3(4), s. 189-198.
- KOŠTÁL, J. (2025) Formativní analýza interaktivních map v datové žurnalistice. Olomouc, Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci s. 87.
- KOUTRAS, E., KRASSANAKIS, V. (2026) Published SGHeatAOI: An Open-Source Python Tool for the Automatic Delineation and Ranking of Areas of Interest (AOIs) Based on Aggregated Gaze Data. In *Proceedings of the Novel and Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 5th International Conference (NiDS 2025)*, Cham, A. KROUSKA, P. MYLONAS, J. CARO eds. Springer Nature Switzerland, 2026// 2026,s. 292-296.
- KRAAK, J.-M., BROWN, A. (2001) Web cartography. UK, London: CRC Press.
- KRAAK, M.-J. (2003) Geovisualization illustrated. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003/04/01/, 57(5), s. 390-399.
- KRAAK, M.-J., ROTH, R. E., RICKER, B., KAGAWA, A., LE SOURD, G. (2020) Mapping for a Sustainable World. United Nations: New York, NY (USA).
- KRASSANAKIS, V., CYBULSKI, P. (2019) A review on eye movement analysis in map reading process: the status of the last decade. *Geodesy and Cartography*, Jun, 68(1), s. 191-209.
- KRASSANAKIS, V., CYBULSKI, P. (2021) Eye tracking research in cartography: Looking into the future. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), s. 411.
- KRASSANAKIS, V., FILIPPAKOPOULOU, V., NAKOS, B. (2016) Detection of Moving Point Symbols on Cartographic Backgrounds. *Journal of Eye Movement Research*, 9(2), s. 1-16.
- KRAY, C., SCHMID, F., FRITZE, H. (2017) Guest editorial: map interaction. *Geoinformatica*, 2017/07/01, 21(3), s. 573-576.
- KREDEL, R., VATER, C., KLOSTERMANN, A., HOSSNER, E.-J. (2017) Eye-Tracking Technology and the Dynamics of Natural Gaze Behavior in Sports: A Systematic Review of 40 Years of Research. *Frontiers in Psychology*, 2017-October-17, Volume 8 - 2017, s.
- KRUG, S. (2013) Don't Make Me Think, Revisited: A Common Sense Approach to Web Usability. New Riders, 216 s.
- KUBÍČEK, P., ŠAŠINKA, Č., STACHOŇ, Z., HERMAN, L., JUŘÍK, V., URBÁNEK, T., CHMELÍK, J. (2019) Identification of altitude profiles in 3D geovisualizations: the role of interaction and spatial abilities. *International Journal of Digital Earth*, 2019/02/01, 12(2), s. 156-172.
- KUDELKÁ, V., DOBESOVA, Z., SGEM (2015) Published EYE-TRACKING TESTING OF GIS INTERFACES. In *Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM)*, Albena, BULGARIA, SOFIA: Stef92 Technology Ltd, Jun 18-24 2015,s. 585-592.
- KWOK, T. C. K., KIEFER, P., SCHINAZI, V. R., ADAMS, B., RAUBAL, M., ASSOC COMP, M. (2019) Published Gaze-Guided Narratives: Adapting Audio Guide Content to Gaze in Virtual and Real Environments. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, Glasgow, SCOTLAND, NEW YORK: Assoc Computing Machinery, May 04-09 2019,s.

- LAI, M.-L., TSAI, M.-J., YANG, F.-Y., HSU, C.-Y., LIU, T.-C., LEE, S. W.-Y., LEE, M.-H., CHIOU, G.-L., LIANG, J.-C., TSAI, C.-C. (2013) A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 2013/12/01/, 10, s. 90-115.
- LAPAINE, M., MIDTBØ, T., GARTNER, G., BANDROVA, T., WANG, T., SHEN, J. (2021) Definition of the Map. *Adv. Cartogr. GIScience Int. Cartogr. Assoc.*, 3, s. 9.
- LIAO, H., DONG, W., PENG, C., LIU, H. (2017) Exploring differences of visual attention in pedestrian navigation when using 2D maps and 3D geobrowsers. *Cartography and Geographic Information Science*, 44(6), s. 474-490.
- LÓPEZ-ORNELAS, E., ABASCAL-MENA, R., ZEPEDA-HERNÁNDEZ, J. S. (2013) Published Geospatial Web Interfaces, Why Are They So “Complicated”? In *Proceedings of the Design, User Experience, and Usability. Web, Mobile, and Product Design*, Berlin, Heidelberg, A. MARCUS ed. Springer Berlin Heidelberg, 2013// 2013, s. 231-237.
- MACEACHREN, A. (1995) *How maps work: Representation, Visualization & Design*. The Guilford Press.
- MACEACHREN, A. M. (1994) Chapter 1 - Visualization in Modern Cartography: Setting the Agenda. In A.M. MACEACHREN, D.R.F. TAYLOR eds. *Modern Cartography Series*. Academic Press, vol. 2, s. 1-12.
- MACEACHREN, A. M., KRAAK, M.-J. (1997) Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. *Computers & Geosciences*, 1997/05/01/, 23(4), s. 335-343.
- MACEACHREN, A. M., TAYLOR, D. R. F. (1994) *Visualization in Modern Cartography*. Oxford, U.K. ; New York : Pergamon: Pergamon, 368 s.
- MANSON, S. M., KNE, L., DYKE, K. R., SHANNON, J., ERIA, S. (2012) Using Eye-tracking and Mouse Metrics to Test Usability of Web Mapping Navigation. *Cartography and Geographic Information Science*, 2012/01/01, 39(1), s. 48-60.
- MARSHALL, S. (2002) The Index of Cognitive Activity: Measuring cognitive workload. 7-5 s.
- MARTINEZ-CONDE, S., MACKNIK, S. L. (2008) Fixational eye movements across vertebrates: Comparative dynamics, physiology, and perception. *Journal of Vision*, 8(14), s. 28-28.
- MAY, J., GAMBLE, T., ACM (2014) Published Collocating Interface Objects: Zooming into Maps. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, Toronto, CANADA, NEW YORK: Assoc Computing Machinery, Apr 26-May 01 2014, s. 2085-2094.
- MCCALL, J. A., RICHARDS, P. K., WALTERS, G. F. *Factors in Software Quality*. USA, 1977.
- MENDONÇA, A., DELAZARI, L. (2014) Testing Subjective Preference and Map Use Performance: Use of Web Maps for Decision Making in the Public Health Sector. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 06/01, 49, s. 114-126.
- MENDONÇA, A. L. A., DELAZARI, L. S. (2012) Remote Evaluation of the Execution of Spatial Analysis Tasks with Interactive Web Maps: A Functional and Quantitative Approach. *Cartographic Journal The*, 02/01, 49, s. 7-20.
- MERCHANT, J. *The oculometer*. Boston, MA, United States, 1967. Contractor Report (CR): Honeywell, Inc. Dostupné na WWW:<<https://ntrs.nasa.gov/citations/19670022152>>.
- MONTELLLO, D. R. (2002) Cognitive Map-Design Research in the Twentieth Century: Theoretical and Empirical Approaches. *Cartography and Geographic Information Science*, 29, s. 283 - 304.
- MORENO-ARJONILLA, J., LÓPEZ-RUIZ, A., JIMÉNEZ-PÉREZ, J. R., CALLEJAS-AGUILERA, J. E., JURADO, J. M. (2024) Eye-tracking on virtual reality: a survey. *Virtual Reality*, 2024/02/05, 28(1), s. 38.
- NAPIERALSKI, P. E., ALTENHOFF, B. M., BERTRAND, J. W., LONG, L. O., BABU, S. V., PAGANO, C. C., DAVIS, T. A. (2014) An evaluation of immersive viewing on spatial knowledge acquisition in spherical panoramic environments. *Virtual Reality*, Sep, 18(3), s. 189-201.
- NESET, T.-S., OPACH, T., LION, P., LILJA, A., JOHANSSON, J. (2016) Map-Based Web Tools Supporting Climate Change Adaptation. *The Professional Geographer*, 2016/01/02, 68(1), s. 103-114.
- NÉTEK, R. (2020) *Webová kartografie – specifika tvorby interaktivních map na webu*. CZ, Olomouc: Palacky University Olomouc.
- NIELSEN, J. (1994) *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.
- NIELSEN, J. *Usability Metrics*. vol., s. [cit. 31.5.2023-2023]. Dostupné na WWW: <<https://www.nngroup.com/articles/usability-metrics/>>.
- NIVALA, A.-M. (2007) *Usability Perspectives for the Design of Interactive Maps*. Helsinki, Finland, Dissertation. Helsinki University of Technology s.
- NIVALA, A.-M., BREWSTER, S., SARJAKOSKI, L. (2008) Usability Evaluation of Web Mapping Sites. *The Cartographic Journal*, 05/01, 45, s.
- NORMAN, D. (1988) *The Psychology Of Everyday Things*. New York: Basic Books.
- NOVÁK, J. Š., JAN, M., PETR, B., PAVEL, Š., AND MERUNKA, V. (2024) Eye Tracking, Usability, and User Experience: A Systematic Review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024/09/01, 40(17), s. 4484-4500.
- OLSSON, P.-O., PIPPIG, K., HARRIE, L., STIGMAR, H. (2011) Identifying areas of a map that are difficult to read. *Mapping and Image Science*, 01/01, s. 22-29.
- OOMS, K., COLTEKIN, A., DE MAEYER, P., DUPONT, L., FABRIKANT, S., INCOUL, A., KUHN, M., SLABBINCK, H., VANSTEENKISTE, P., VAN DER HAEGEN, L. (2015) Combining user logging with eye tracking for interactive and dynamic applications. *Behavior Research Methods*, 2015/12/01, 47(4), s. 977-993.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V. (2010) Analyzing eye movement patterns to improve map design. 5 s.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V., VAN ASSCHE, E., WITLOX, F. (2012a) Interpreting maps through the eyes of expert and novice users. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(10), s. 1773-1788.
- OOMS, K., MAEYER, P. D., FACK, V., ASSCHE, E. V., WITLOX, F. (2012b) Investigating the Effectiveness of an Efficient Label Placement Method Using Eye Movement Data. *The Cartographic Journal*, 2012/08/01, 49(3), s. 234-246.
- OPACH, T., GOLEBIEWSKA, I., FABRIKANT, S. I. (2014) How Do People View Multi-Component Animated Maps? *Cartographic Journal*, Nov, 51(4), s. 330-342.
- OPACH, T., NOSSUM, A. S. (2011) Published EVALUATING THE USABILITY OF CARTOGRAPHIC ANIMATIONS WITH EYE-MOVEMENT ANALYSIS. In *Proceedings of*, 2011, s.
- ORFORD, S., DORLING, D., HARRIS, R. (2003) *Cartography and Visualization*. In A. ROGERS, H.A. VILES eds. *The Student's Companion to Geography*. Blackwell, s. 151-156.
- PAGE, M. J., MCKENZIE, J. E., BOSSUYT, P. M., BOUTRON, I., HOFFMANN, T. C., MULROW, C. D., SHAMSEER, L., TETZLAFF, J. M., AKL, E. A., BRENNAN, S. E., CHOU, R., GLANVILLE, J., GRIMSHAW, J. M., HRÓBJARTSSON, A., LALU, M. M., LI, T., LODER, E. W., MAYO-WILSON, E., MCDONALD, S., MCGUINNESS, L. A., STEWART, L. A., THOMAS, J., TRICCO, A. C., WELCH, V. A., WHITING, P., MOHER, D. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 2021/03/29, 10(1), s. 89.
- PAPOUTSAKI, A., SANGKLOY, P., LASKEY, J., DASKALOVA, N., HUANG, J., HAYS, J. (2016) Webgazer: scalable webcam eye tracking using user interactions. In *Proceedings of the Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, New York, New York, USA, AAAI Press, s. 3839-3845.
- PENG, C. F., LIAO, W. H., IEEE (2016) Published Evaluation of interactive data visualization tools based on gaze and mouse tracking. In *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Multimedia (IEEE ISM)*, San Jose, CA, NEW YORK: Ieee, Dec 11-13 2016, s. 431-434.
- PETERSON, M. P. (2003) *Maps and the Internet*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- PETERSON, M. P. (2007) *The Internet and Multimedia Cartography*. Berlin: Springer.
- PLASS, J. L., MORENO, R., BRÜNKEN, R. (2010) Cognitive load theory, s.
- PLUŻYCZKA, M. (2018) The First Hundred Years: a History of Eye Tracking as a Research Method. *Applied Linguistics Papers*, 12/27, 4/2018, s. 101-116.

- POPELKA, S. (2014) Optimal eye fixation detection settings for cartographic purposes. In Proceedings of the 4th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2014, Albena; Bulgaria, s.
- POPELKA, S. (2015) Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybu očí. Olomouc, Doktorská disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta s. 186.
- POPELKA, S. (2018) Eye-tracking (nejen) v kognitivní kartografii: praktický průvodce tvorbou a vyhodnocením experimentu. Olomouc, CZ: Univerzita Palackého v Olomouci pro katedru geoinformatiky.
- POPELKA, S. (2024) The evaluation of cartographic visualization methods and interactive map interfaces through eye-tracking technology. Olomouc, Habilitation thesis. Palacký University Olomouc, Faculty of Science s. 284.
- POPELKA, S., BURIAN, J., BEITLOVA, M. (2022) Swipe versus multiple view: a comprehensive analysis using eye-tracking to evaluate user interaction with web maps. *Cartography and Geographic Information Science*, 2022/05/04, 49(3), s. 252-270.
- POPELKA, S., HERMAN, L., REZNÍK, T., PARILOVÁ, M., JEDLIČKA, K., BOUCHAL, J., KEPKA, M., CHARVÁT, K. (2019a) User Evaluation of Map-Based Visual Analytic Tools. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Aug, 8(8), s. 22.
- POPELKA, S., VONDRAKOVA, A., HUJNAKOVA, P. (2019b) Eye-tracking evaluation of weather web maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), s.
- PORTI SUAREZ, A., POPELKA, S. (2024) Design Aspects for COVID-19 Dashboards – Evidence from Eye-Tracking Evaluation. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024/11/16, 40(22), s. 7800-7818.
- PROVIS, J. M., DUBIS, A. M., MADDESS, T., CARROLL, J. (2013) Adaptation of the central retina for high acuity vision: cones, the fovea and the avascular zone. *Prog Retin Eye Res*, Jul, 35, s. 63-81.
- PUTRA, H. F., OGATA, K. (2022) NAVIGATING THROUGH GOOGLE MAPS USING AN EYE-GAZE INTERFACE SYSTEM. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 18(2), s. 417-432.
- QIAO, L. G., WU, M. G. (2024) An exploratory tag map for attributes-in-space tasks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Sep, 133, s. 14.
- QVARFORDT, P., BEYMER, D., ZHAI, S. (2005) Published RealTourist - A study of augmenting human-human and human-computer dialogue with eye-gaze overlay. In *Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2005, s. 767-780.
- RANTI, C., JONES, W., KLIN, A., SHULTZ, S. (2020) Blink Rate Patterns Provide a Reliable Measure of Individual Engagement with Scene Content. *Scientific Reports*, 2020/05/19, 10(1), s. 8267.
- RAYNER, K. (1978) Eye movements in reading and information processing. *Psychological Bulletin*, 05/01, 85, s. 618-660.
- RAYNER, K. (1998) Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychol Bull*, Nov, 124(3), s. 372-422.
- RETCHLESS, D., MOBLEY, W., DAVLASHERIDZE, M., ATOBA, K., ROSS, A. D., HIGHFIELD, W. (2021) Mapping cross-scale economic impacts of storm surge events: considerations for design and user testing. *Journal of Maps*, 2021/01/01, 17(1), s. 123-135.
- REZK, A. A., HENDAWY, M. (2023) Informative cartographic communication: a framework to evaluate the effects of map types on users' interpretation of COVID-19 geovisualizations. *Cartography and Geographic Information Science*, s. 1-18.
- RIDING, R., SADLER-SMITH, E. (1997) Cognitive Style and Learning Strategies: Some Implications for Training Design. *International Journal of Training and Development*, 1, s. 199-208.
- ROHRER, C. When to Use Which User-Experience Research Methods. vol., s. [cit. 07/06/2023-2023]. Dostupné na WWW: <<https://www.nngroup.com/articles/which-ux-research-methods/>>.
- ROTH, R. (2012) Cartographic Interaction Primitives: Framework and Synthesis. *Cartographic Journal* The, 11/01, 49, s. 376-395.
- ROTH, R. (2013a) Interactive Maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, 06/15, 6, s. 59-115.
- ROTH, R. (2013b) An Empirically-Derived Taxonomy of Interaction Primitives for Interactive Cartography and Geovisualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12/01, 19, s. 2356-2365.
- ROTH, R. (2015) Interactivity and Cartography: A Contemporary Perspective on User Interface and User Experience Design from Geospatial Professionals. *Cartographica*, 06/01, 50, s. 94-115.
- ROTH, R., HARROWER, M. (2008) Addressing Map Interface Usability: Learning from the Lakeshore Nature Preserve Interactive Map. *Cartographic Perspectives*, 04/27, s. 46-66.
- ROTH, R., MACEACHREN, A. (2016) Geovisual analytics and the science of interaction: An empirical interaction study. *Cartography and Geographic Information Science*, 04/14, 43, s. 1-24.
- ROTH, R. E. (2017) User Interface and User Experience (UI/UX) Design. *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*, 2nd Quarter 2017 Edition, s.
- ROTH, R. E., ÇÖLTEKIN, A., DELAZARI, L., FILHO, H. F., GRIFFIN, A., HALL, A., KORPI, J., LOKKA, I., MENDONÇA, A., OOMS, K., VAN ELZAKKER, C. P. J. M. (2017) User studies in cartography: opportunities for empirical research on interactive maps and visualizations. *International Journal of Cartography*, 2017/10/30, 3(sup1), s. 61-89.
- ROTH, R. E., DONOHUE, R. G., SACK, C. M., WALLACE, T. R., BUCKINGHAM, T. M. A. (2015a) A Process for Keeping Pace with Evolving Web Mapping Technologies. *Cartographic Perspectives*, 01/06, 0(78), s. 25-52.
- ROTH, R. E., ROSS, K. S., MACEACHREN, A. M. (2015b) User-Centered Design for Interactive Maps: A Case Study in Crime Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), s. 262-301.
- ROVIRA, C. (2016) Theoretical foundation and literature review of the study of concept maps using eye tracking methodology. *Profesional de la información*, 01/20, 25(1), s. 59-74.
- RŮŽIČKA, O. (2012) PROFIL UŽIVATELE WEBOVÝCH MAP. Olomouc, Master thesis. Palacký University Olomouc s. 57.
- SACK, C. M. (2018) Curriculum Development and Pedagogy for Teaching Web Mapping. Dissertation. University of Wisconsin-Madison s. 227.
- SACK, C. M., ROTH, R. E. (2017) Design and evaluation of an Open Web Platform cartography lab curriculum. *Journal of Geography in Higher Education*, 2017/01/02, 41(1), s. 1-23.
- SAINT-MARC, C., VILLANOVA-OLIVER, M., DAVOINE, P.-A., PAMS CAPOCCIONI, C., CHENIER, D. (2017) User testing of dynamic geovisualizations: lessons learned and possible improvements for cartographic experiments. *International Journal of Cartography*, 2017/06/01, 3(1), s. 88-101.
- SALTHOUSE, T. A., ELLIS, C. L. (1980) Determinants of Eye-Fixation Duration. *The American Journal of Psychology*, 93(2), s. 207-234.
- SALVUCCI, D. D., GOLDBERG, J. H. (2000) Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications*, Palm Beach Gardens, Florida, USA, Association for Computing Machinery, s. 71-78.
- SANTOS-TORRES, A., ZARRAONANDIA, T., DÍAZ, P., AEDO, I. (2018) Published Exploring interaction mechanisms for map interfaces in virtual reality environments. In *Proceedings of the ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, 2018, s.
- SCOTT, N., RUI, Z., DUNG, L., AND MOYLE, B. (2019) A review of eye-tracking research in tourism. *Current Issues in Tourism*, 2019/06/15, 22(10), s. 1244-1261.
- SHARAFI, Z., SOH, Z., GUÉHÉNEUC, Y.-G. (2015) A systematic literature review on the usage of eye-tracking in software engineering. *Information and Software Technology*, 2015/11/01/, 67, s. 79-107.
- SHARMA, S., KUMAR, B. A. (2025) A systematic review of user-based usability testing practices in self-care mHealth apps. *Digit Health*, Jan-Dec, 11, s. 20552076251374184.

- SHNEIDERMAN, B. (1996) Published The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations. In *Proceedings of the Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*, 3-6 Sept. 1996 1996, s. 336-343.
- SHNEIDERMAN, B. (2002) Promoting universal usability with multi-layer interface design. In *Proceedings of the Proceedings of the 2003 conference on Universal usability*, Vancouver, British Columbia, Canada, Association for Computing Machinery, s. 1-8.
- SHNEIDERMAN, B., PLAISANT, C., COHEN, M., JACOBS, S. (2009) *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Pearson.
- SIIRTOLA, H., RÄIHÄ, K. J. (2011) Published Using gaze data in evaluating interactive visualizations. In *Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, s. 127-141.
- SKOULAS, G. (2023) A review on experimental methods utilized in map perception and cognition. Egaleo, master. UNIVERSITY OF WEST ATTICA & UNIVERSITY OF LIMOGES s. 113.
- SKYLIGHT. (2026) Date Range and Time slider [online]. Skylight support – Filters and alerts. Dostupné na: https://support.skylight.global/en_US/filters-and-alerts/time-slider.
- SLOCUM, T., BLOK, C., JIANG, B., KOUSSOULAKOU, A., MONTELLO, D., FUHRMANN, S., HEDLEY, N. (2001) Cognitive And Usability Issues In Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 01/20, 28, s. 61-75.
- SMITH, M., PARON, P., GRIFFITHS, J. (2011) *Geomorphological mapping: methods and applications*. Elsevier, 610 s.
- SPUR, M., HOUEL, N., TOURRE, V. (2020) Published Visualizing multilayered geospatial data in virtual reality to assess public lighting. In *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, N. PAPARODITIS, C. MALLE, F. LAFARGE, S. ZLATANOVA, S. DRAGICEVIC, G. SITHOLE, G. AGUGIARO, J.J. ARSANJANI, P. BOGUSLAWSKI, M. BREUNIG, M.A. BROVELLI, C. SIDONIE, A. COLTEKIN, M.R. DELAVAR, M. AL DOORI, E. GUILBERT, C.C. FONTE, J. HAWORTH, U. ISIKDAG, I. IVANOVA, Z. KANG, K. KHOSHELHAM, M. KOEVA, M. KOKLA, Y. LIU, M. MADDEN, M.A. MOSTAFAVI, G. NAVRATIL, D.R. PAUDYAL, C. PETTIT, A. SPANO, E. STEFANAKIS, W. TU, G. VACCA, V. DIAZ, S. WISE, H. WU, X.G. ZHOU eds. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, s. 623-630.
- STEINKE, T. (1987) Eye Movement Studies In *Cartography And Related Fields*. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 24, s. 40-73.
- STOFER, K., CHE, X. (2014) Comparing Experts and Novices on Scaffolded Data Visualizations Using Eye-Tracking. *Journal of Eye Movement Research*, 7(5), s. 1-15.
- STRZELECKI, A. (2020) Eye-Tracking Studies of Web Search Engines: A Systematic Literature Review. *Information*, 11(6), s. 300.
- SULTAN, M. N., POPELKA, S., STROBL, J. (2022) ET2Spatial – software for georeferencing of eye movement data. *Earth Science Informatics*, 2022/09/01, 15(3), s. 2031-2049.
- SWELLER, J. (2011) Cognitive load theory. In *Psychology of learning and motivation*. Elsevier, vol. 55, s. 37-76.
- SYNEK, S., SKORKOVSKÁ, Š. (2014) *Fyziologie oka a vidění*. Praha: Grada, 96 s.
- SZIGETI-PAP, C., KIS, D., ALBERT, G. (2023) Understanding Map Misinterpretation: Factors Influencing Correct Map Reading and Common Errors. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(12), s. 479.
- ŠAŠINKA, Č., MORONG, K., STACHOŇ, Z. (2017) The Hypothesis Platform: An Online Tool for Experimental Research into Work with Maps and Behavior in Electronic Environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), s. 407.
- ŠENKEŘÍK, J. (2023) Eye-tracking analýza statických interaktivních map s využitím nástroje ET2Spatial. Olomouc, diplomová práce (Mgr.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI s.
- ŠIROKÝ, J. (2011) *Tvoříme a publikujeme odborné texty*. Brno: Computer Press, 208 s.
- ŠTENČEK, A. (2015) *Hodnocení interaktivní mapy s využitím eye-tracking testování*. Olomouc, Diploma thesis. Palacký University s. 67.
- TATLER, B. W., HANSEN, D. W., PELZ, J. B. (2019) Eye Movement Recordings in Natural Settings. In C. KLEIN, U. ETTINGER eds. *Eye Movement Research: An Introduction to its Scientific Foundations and Applications*. Cham: Springer International Publishing, s. 549-592.
- TATLER, B. W., WADE, N. J., KWAN, H., FINDLAY, J. M., VELICHKOVSKY, B. M. (2010) Yabus, eye movements, and vision. *Iperception*, 1(1), s. 7-27.
- TIKADAR, S., BHATTACHARYA, S. (2021) Detection of Affective States of the Students in a Blended Learning Environment Comprising of Smartphones. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2021/06/15, 37(10), s. 963-980.
- TINKER, M. A. (1936) Review of How People Look at Pictures. *Psychological Bulletin*, 33(2), s. 142-143.
- TOBII.COM. (2021) Assisted mapping in Tobii Pro Lab (webinar) [online]. Tobii. Dostupné na: <https://www.tobii.com/resource-center/webinars/assisted-mapping-tobii-prolab>.
- TOBÓN, C. (2005) Chapter 34 - Evaluating Geographic Visualization Tools and Methods: An Approach and Experiment Based upon User Tasks. In J. DYKES, A.M. MACEACHREN, M.-J. KRAAK eds. *Exploring Geovisualization*. Oxford: Elsevier, s. 645-666.
- TORRENS, P. M., KIM, R. (2024) Evoking embodiment in immersive geosimulation environments. *Annals of Gis*, Jan, 30(1), s. 35-66.
- TULLIS, T., ALBERT, B. (2013) *Measuring the User Experience*. Elsevier; Morgan Kaufmann (imprint).
- VAN DER GEEST, J. N., KEMNER, C., CAMFFERMAN, G., VERBATEN, M. N., VAN ENGELAND, H. (2001) Eye movements, visual attention, and autism: a saccadic reaction time study using the gap and overlap paradigm. *Biological Psychiatry*, 2001/10/15, 50(8), s. 614-619.
- VAN DER STIGCHEL, S., ROMMELSE, N. N. J., DEIJEN, J. B., GELDOF, C. J. A., WITLOX, J., OOSTERLAAN, J., SERGEANT, J. A., THEEUWES, J. (2007) Oculomotor capture in ADHD. *Cognitive Neuropsychology*, 2007/07/01, 24(5), s. 535-549.
- VANICEK, T., POPELKA, S. (2023) The think-aloud method for evaluating the usability of a regional atlas. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(3), s. 95.
- VANIČEK, T. (2022) Využití metody think-aloud v kartografickém výzkumu. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 97.
- VANIČEK, T., GHARIBPOUR, R., KESKIN, M., POPELKA, S. (2025a) Exploring the Possibilities and Limitations of Webcam-Based Eye-Tracking for Interactive and Static Map Studies: A Comparative Perspective on WebGazer and RealEye. *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 10, s. 288.
- VANIČEK, T., ŠENKEŘÍK, J., POPELKA, S. (2025b) ET2GIS & ET2QGIS Tools: Integrating ET2Spatial Outputs into GIS for Eye Movement Analysis of Web Maps. *Earth Science Informatics*, s.
- VILIŠ, T. (2013) *Znakový klíč pro tvorbu mapy stěhování národů. UP v Olomouci, Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci s. 42.*
- VINCENT, K., ROTH, R. E., MOORE, S. A., HUANG, Q., LALLY, N., SACK, C. M., NOST, E., ROSENFELD, H. (2019) Improving spatial decision making using interactive maps: An empirical study on interface complexity and decision complexity in the North American hazardous waste trade. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(9), s. 1706-1723.
- VIZCARRA, A., QUIROZ, G., CORNEJO, J. (2026) The Impact of User Interface and Experience (UI/UX) Design on Visual Ergonomics: A Technical Approach for Reducing Human Error in Industrial Settings. *Designs*, 10(1), s. 8.
- VOJTECHOVSKA, M., POPELKA, S. (2026) GazePlotter: An open-source solution for the automatic generation of scarf plots from eye-tracking data. *Behavior Research Methods*, 2026/03/12, 58(3), s. 85.
- VONDRÁKOVA, A. (2013) NON-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MAP PRODUCTION. In *Proceedings of the GEOCONFERENCE ON INFORMATICS, GEOINFORMATICS AND REMOTE SENSING - CONFERENCE PROCEEDINGS, VOL I*, s. 813-820.
- VORKÜHLER, A., NORDMEIER, V., KUCHINKE, L., JACOBS, A. M. (2008) OGAMA (Open Gaze and Mouse Analyzer): Open-source software designed to analyze eye and mouse movements in slideshow study designs. *Behavior Research Methods*, 2008/11/01, 40(4), s. 1150-1162.
- VÚGTK. (2020) *Slovník VÚGTK* [online]. Terminologická komise ČÚŽK. Dostupné na: <https://slovníkczuk.eu/>.
- WADE, N. J. (2010) Pioneers of eye movement research. *Iperception*, 1(2), s. 33-68.

- WADE, N. J. (2020) Looking at Buswell's pictures. *J Eye Mov Res*, Jun 2, 13(2), s.
- Tobii Blog [online]. Tobii, 2019 [cited 28.05. 2026]. Available from Internet: <<https://www.tobii.com/blog/realistic-virtual-vision-with-dynamic-foveated-rendering>>.
- WACHOWICZ, M., VULLINGS, W., BULENS, J. D., DE GROOT, H. L. E., VAN DEN BROEK, M. A. (2005) Uncovering the main elements of geo-web usability. In *Proceedings of the AGILE 2005; 8th conference on geographic information science*, F. TOPPEN, M. PAINHO eds., Lisboa (Portugal): ISEGI-UNL, s. 317-332.
- WANG, S., CHEN, Y., YUAN, Y., YE, H., ZHENG, S. (2016) Visualizing the Intellectual Structure of Eye Movement Research in Cartography. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(10), s. 168.
- WEDEL, M., PIETERS, R. (2008) Eye Tracking for Visual Marketing. *Foundations and Trends® in Marketing*, 1(4), s. 231-320.
- WILLIAMS, L. G. (1971) The Role Of The User In The Map Communication Process: Obtaining Information From Displays With Discrete Elements. *Cartographica*, 8(2), s. 29-34.
- YANG, L., QIN, S. F. (2021) A Review of Emotion Recognition Methods From Keystroke, Mouse, and Touchscreen Dynamics. *Ieee Access*, 9, s. 162197-162213.
- YARBUS, A. L. (1967) *Eye Movements and Vision*. New York: Springer New York, NY, 222 s.
- YOUNG, L. R., SHEENA, D. (1975) Eye-movement measurement techniques. *American Psychologist*, 30(3), s. 315-330.
- ZBIEJCZUK SUCHÁ, L., POPELKA, S., ŠAŠINKOVÁ, A., GODIŠKOVÁ, G., BEITLOVÁ, M., VANÍČEK, T., STACHOŇ, Z., ŠAŠINKA, Č. (2026) The map maker's dilemma: Design challenges in interactive mapping for social science and data journalism. *Information Discovery and Delivery*, ahead-of-print(ahead-of-print), s. 1-14.
- ZHANG, X., ZHOU, W., SHEN, J., HERMAN, L., DU, Y. (2019) 3D Interactive Visualization Method of Urban Waterlogging Based on Cesium. *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 1, s. 433.

PŘÍLOHY

13 PŘÍLOHY

Disertační práce **neobsahuje přílohy** v podobě samostatných tištěných dokumentů. Podkladová data k jednotlivým dílčím cílům a případovým studiím byla zveřejněna v **elektronické podobě** prostřednictvím webového datového úložiště vytvořeného na platformě GitHub. Web sdružuje dostupné exporty, tabulky, souhrnné přehledy, PDF dokumenty a další datové podklady uspořádané podle dílčích cílů a případových studií DC1, DC2, DC3 a PS1–PS5.

Web s podkladovými daty je k dispozici na:

Vaniček, Tomáš. *Datové úložiště disertační práce: Hodnocení použitelnosti interaktivních kartografických vizualizací metodou eye-tracking* [online]. Olomouc, 2026. Poslední aktualizace 21. 05. 2026 [cit. 2026-05-21]. Dostupné z: <https://vanicektomas.github.io/data-disertace/>

Eye-tracking projekty k jednotlivým případovým studiím nejsou vzhledem k velké datové velikosti součástí veřejného webového úložiště. Jsou archivovány v eye-tracking laboratoři na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci v adresáři:

ET data (E:) → VANICEK → DC2_Leaflet, PS1, PS2, PS3, PS4, PS5.

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky



Mgr. Tomáš Vaniček | Doktorská disertační práce

2026
