

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky



Univerzita Palackého
v Olomouci

Studijní program: **P1301 Geografie**
Obor: **1302V011 Geoinformatika a kartografie**

HODNOCENÍ 3D VIZUALIZACÍ V GIS S VYUŽITÍM SLEDOVÁNÍ POHYBU OČÍ

Doktorská disertační práce

Mgr. Stanislav POPELKA

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

Olomouc 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci doktorského studia oboru Geoinformatika a kartografii vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Víta Voženíka, CSc.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Všechna poskytnutá i vytvořená data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci dne 31. 3. 2015

Děkuji vedoucímu práce prof. RNDr. Vítu Voženílkovi, CSc. za podněty a připomínky při tvorbě práce. Kolegům z katedry děkuji nejen za připomínky a rady, ale zejména za to, že tvoří skvělý kolektiv, ve kterém je radost pracovat. Jmenovitě bych rád poděkoval Bětce, Jitunce, Honzovi a také Evropskému sociálnímu fondu, díky němuž jsem mohl konzultovat a prezentovat dílčí výsledky práce za hranicemi České republiky. Dále bych rád poděkoval všem kamarádům, kteří mě podpořili, když se nedařilo a především rodině, která mi umožnila studovat na univerzitě.

OBSAH

ÚVOD	5
1. CÍLE PRÁCE	6
2. METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	8
2.1. Metody řešení cílů práce	8
2.2. Použité technické a programové vybavení.....	11
2.3. Postup zpracování	12
3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
3.1. Studie použitelnosti.....	13
3.2. Výzkum užití map (Map Use Research)	14
3.3. Eye-tracking	20
3.3.1. Charakteristika lidského oka.....	20
3.3.2. Sledování pohybu očí	21
3.4. 3D geovizualizace	23
4. DC 1 - HODNOCENÍ METOD ANALÝZY EYE-TRACKING DAT	26
4.1. Hodnocení metod identifikace fixací a sakád	27
4.1.1. Algoritmy identifikace fixací a sakád.....	28
4.1.2. Srovnání nastavení algoritmu I-DT	30
4.1.3. Identifikace fixací a sakád v aplikaci OGAMA	32
4.2. Metody analýzy eye-tracking dat	33
4.2.1. Vizualizace trajektorií – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube.....	33
4.2.2. Scanpath comparison	36
4.2.3. Attention maps.....	39
4.2.4. Analýza oblastí zájmu.....	41
4.2.5. GIS analýzy v programu V-Analytics	44
4.2.6. Manuální analýza dat.....	45
4.2.7. Statistické vyhodnocení eye-tracking dat	46
4.3. Volba metody analýzy E-T dat	49
5. DC 2A - PŘÍPADOVÁ STUDIE - 3D REPREZENTACE RELIÉFU	54
5.1. Hodnocení použitelnosti perspektivních 3D map	54
5.1.1. Design E-T experimentů „DualMap“ a „SingleMap“	55
5.1.2. Analýza dotazníku k experimentu „DualMap“	57
5.1.3. Eye-tracking analýza „DualMap“ experimentu.....	59
5.1.4. Eye-tracking analýza „SingleMap“ experimentu	62
5.2. Hodnocení použitelnosti stínování v mapách	65
5.2.1. Vliv stínování z jihovýchodu na percepci map.....	65

5.2.2.	Design experimentu „Shading – Mapy.cz“	67
5.2.3.	Eye-tracking analýza dat z experimentu „Shading – Mapy.cz“	68
6.	DC 2B - PŘÍPADOVÁ STUDIE - 3D VIZUALIZACE MĚST.....	75
6.1.	Fotorealistická vizualizace zaniklé obce	75
6.1.1.	Design E-T experimentu „Extinct Village“	76
6.1.2.	Eye-tracking analýza dat experimentu „Extinct Village“	77
6.2.	Nefotorealistické 3D mapy měst	80
6.2.1.	Design experimentu „3D Cities“	80
6.2.2.	Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Cities“	82
7.	DC 2C - PŘÍPADOVÁ STUDIE – TEMATICKÉ 3D MAPY	87
7.1.	Tematické 3D mapy – metoda areálových znaků	87
7.1.1.	Design E-T experimentu „3D Thematic – Areal“	88
7.1.2.	Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Thematic – Areal“	90
7.2.	Tematické 3D mapy – bodové znaky	97
7.2.1.	Design E-T experimentu „3D Thematic – Points“	97
7.2.2.	Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Thematic – Points“	98
8.	DC 3 - DOPORUČENÍ PRO EYE-TRACKING VÝZKUM V KARTOGRAFII..	104
8.1.	Doporučení pro eye-tracking testování	104
8.2.	Doporučení pro analýzu eye-tracking dat	106
9.	VÝSLEDKY	109
10.	DISKUZE	113
11.	ZÁVĚR	115
12.	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	116
	SUMMARY	124

ÚVOD

Tématem disertační práce je „Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybu očí“. Název práce lze rozdělit na dvě části – „3D vizualizace“ a „sledování pohybu očí“.

K problematice 3D vizualizace jsem nahlédl už v bakalářském studiu v průběhu zpracování závěrečné klasifikační práce s názvem „Google a ArcGIS, nové možnosti v 3D vizualizaci“. Problematika 3D modelování mě zaujala, a proto jsem pokračoval v jejím studiu i praktickém využití. Tímto tématem se částečně zabývala také moje magisterská práce s názvem „Analýzy viditelnosti a jejich vizualizace“, jejíž výsledky bylo možné zobrazit mimo jiné v prostředí Google Earth, které je v současnosti velmi rozšířené i mezi laickou veřejností.

V aplikaci Google Earth, ale i na mnoha dalších místech, je stále častěji možné se setkat s perspektivním 3D pohledem na zobrazená data – nejčastěji zemský terén. Takové zobrazení je vizuálně velmi atraktivní, je však otázkou, zda tato forma vizualizace opravdu pomůže lepší představě o situaci, než pokud by byl terén zobrazen například pomocí vrstevnic.

Na otázky týkající se provedení, percepce a vhodnosti 3D a pseudo 3D vizualizace v mapách je možné hledat odpověď mnoha způsoby. Současným trendem je hodnocení map pomocí metody sledování pohybu očí, běžně označované jako eye-tracking. Díky ní je možné zobrazit a analyzovat trajektorii pohybu očí přímo v okamžiku čtení mapy. Pomocí eye-trackingu je možné s relativně velkou přesností zjistit, kam přesně se uživatel v mapě díval. Lze lokalizovat místa, která ho nejvíce zaujala, která byla naopak problematická, či obecně zhodnotit jeho chování při čtení mapy. V kombinaci s dalšími metodami studií použitelnosti je eye-tracking vhodným nástrojem pro hodnocení map a kartografických vizualizací.

Katedra geoinformatiky UP v Olomouci je prvním a doposud jediným kartografickým pracovištěm v České republice, které touto technologií disponuje. Katedra se dala na cestu eye-tracking výzkumu v roce 2011, kdy jsem začal s doktorským studiem. Tato problematika mne zaujala, proto jsem si zvolil téma práce využívající tohoto zařízení.

V České republice nebyl v kartografii kromě Katedry geoinformatiky UP v Olomouci eye-tracking dosud využit. 3D vizualizace nebyly, až na několik málo výjimek, touto metodou hodnoceny ani v celosvětovém měřítku.

V rámci Evropy existuje pouze několik pracovišť zabývajících se hodnocením kartografických děl pomocí eye-trackingu. Přesto je v odborných publikacích i na kartografických konferencích jasně patrný trend vzrůstajícího zájmu o tuto problematiku.

1. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je vyhodnocení vhodnosti metod 3D vizualizace v geografických informačních systémech pomocí analýzy eye-tracking experimentů. Eye-tracking testování je jednou z metod studia použitelnosti a umožní rozpoznat, které způsoby kartografické vizualizace jsou efektivnější při přenosu prostorové informace.

V současném pojetí je za 3D metodu (kartografické) vizualizace obvykle považován dvojrozměrný obraz v perspektivním pohledu (Voženílek, 2005). Právě tyto perspektivní pohledy, aplikované na různé typy kartografických dat, budou nejčastějším typem hodnocených stimulů, tedy obrazů prezentovaných v průběhu experimentu. V případě perspektivního pohledu se jedná o 3D vizuální reprezentaci dat, která je následně zobrazená na 2D rovině monitoru počítače. Problematika různých úrovní 3D dimenzionality je detailněji popsána v podkapitole 3.4.

Metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat existuje velké množství, ne všechny jsou však vhodné pro analýzu záznamů pohybu oka při řešení úkolů s kartografickou tematikou. Vhodné metody budou podrobně popsány a jejich možnosti budou představeny na příkladu kartografických úloh. Kromě běžně využívaných metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat budou pro řešení cílů disertační práce využity postupy vizualizace a analýzy využívané v GIS aplikacích. Jednotlivé metody budou ohodnoceny na základě několika kritérií. Finálním rozhodovacím schématem bude poskytnut návod pro výběr konkrétní metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat.

Nejvhodnější metody analýzy a vizualizace budou aplikovány na data naměřená v sedmi eye-tracking experimentech zaměřených na rozdíly ve vnímání různých metod 3D vizualizace využívaných v kartografii. Zjištěné poznatky o možnostech a omezeních eye-tracking v kartografickém výzkumu budou shrnuty do sady doporučení.

Cíle disertační práce jsou rozděleny do tří dílčích částí:

DC 1 - Rozbor vhodnosti metod analýzy eye-tracking dat

Analýzami eye-tracking dat jsou uvažovány jak metody statistické analýzy, tak vizuální analýza (visual analytics) různých způsobů vizualizace eye-tracking dat. Metody analýzy eye-tracking dat mohou pracovat buď přímo s prvotními (raw) daty, nebo s daty klasifikovanými na fixace a sádky. Z toho důvodu je úvodní část DC 1 zaměřena na popis způsobů identifikace těchto základních pohybů očí. Důležitým dílčím výstupem je specifikace nastavení identifikačního algoritmu I-DT, které bude využíváno ve všech experimentech řešených v disertační práci.

Další částí DC 1 je klasifikace, popis a praktické představení metod analýzy eye-tracking dat. Jedná se o:

- Vizualizace trajektorií – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube
- Porovnání průběhu trajektorií – Scanpath comparison
- Attention maps
- Analýzy oblastí zájmu – AOI Transitions, Gridded AOI, Sequence Chart, Binning Chart
- GIS analýzy v programu V-Analytics – FlowMap, TimeLine
- Manuální analýza eye-tracking dat
- Statistická analýza – Eye-tracking metriky

U všech popisovaných metod bude zhodnoceno, pro jaké kartografické úlohy jsou vhodné, na jaké otázky mohou jejich výsledky odpovědět a jak náročné a rychlé jsou metody pro operátora (analytika).

Hlavním výsledkem DC 1 je rozhodovací schéma, podle něhož je možné na základě typu hodnocených dat a testovaných hypotéz zvolit nejvhodnější metodu analýzy eye-tracking dat. Rozhodovací schéma a hodnocení metod lze použít pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat v budoucích experimentech s kartografickou tematikou.

Vybranými metodami budou vyhodnoceny eye-tracking experimenty zaměřené na porovnání 2D a 3D vizualizace.

DC 2 – Návrh, sestavení, průběh a vyhodnocení experimentů

Obsahem dalšího dílčího cíle je návrh, průběh a vyhodnocení experimentů zaměřených na analýzu rozdílného vnímání 2D a 3D kartografických vizualizací. Vyhodnocení experimentů proběhne s využitím metod popsanych a ohodnocených v DC 1. Eye-tracking experimenty budou v určitých případech doplněny o dotazníkové šetření.

Výstupem DC 2 je sada 7 experimentů (tab. 1), naměřená data a okomentované výsledky jednotlivých experimentů.

Tab. 1 Experimenty vypracované v rámci disertační práce

	Experiment	Téma experimentu	Metoda sběru dat
DC 2a Reliéf	DualMap	Perspektivní pohledy	Eye-tracking + dotazník
	SingleMap	Perspektivní pohledy	Eye-tracking
	Shading – Mapy.cz	Stínování v mapách	Eye-tracking + dotazník
DC 2b Města	Extinct Village	Fotorealistická vizualizace obce	Eye-tracking
	3D Cities	Nefotorealistická vizualizace měst	Eye-tracking + dotazník
DC 2c Tematický obsah	Thematic 3D – Areal	Tematické 3D mapy – Prostorový kartogram a stínovaný kartogram	Eye-tracking
	Thematic 3D - Points	Tematické 3D mapy – 3D bodové znaky	Eye-tracking

DC 3 – Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii

Výsledkem třetího dílčího cíle disertační práce bude sada doporučení pro eye-tracking testování a vyhodnocení eye-tracking dat v kartografickém výzkumu. Sada doporučení bude vytvořena na základě zkušeností autora z tvorby, provedení a analýzy sedmi eye-tracking experimentů, které vznikly při řešení DC 2, stejně jako z dalších experimentů, které autor provedl jako krátké výzkumné studie nebo pro testování možností eye-trackeru.

2. METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

2.1. Metody řešení cílů práce

Literární rešerše zahraničních publikací a konzultace se zahraničními odborníky na kognitivní kartografii a eye-tracking ukázaly, že přestože je 3D vizualizace stále častěji využívána, nebyla doposud komplexněji hodnocena z pohledu uživatelské kognice. Hodnocením 3D vizualizace pomocí eye-trackingu se v České republice doposud nikdo nezabýval. Ve světě existuje pouze několik málo studií zaměřených na analýzu čtení 3D vizualizací pomocí eye-trackingu. Proto byl teoretický a metodologický základ výzkumu opřen o studie zabývající se jinými typy kartografických děl a výzkum z jiných vědních oblastí než je kartografie.

V disertační práci jsou hodnoceny různé metody 3D vizualizace využívané v kartografii. Pro praktické využití výsledků disertačního výzkumu byly vybrány oblasti, ve kterých je 3D vizualizace využívána nejčastěji. Pro tyto oblasti byly literární rešerší zjištěny nejčastěji používané metody vizualizace, které je možné vzájemně porovnat a otestovat systémem eye-tracking.

Pravá 3D zobrazení (stereopáry, 3D monitory, anaglyf) nebyla do výběru zahrnuta. Jejich testování systémem eye-tracking by se zařízením dostupným na KGI nebylo možné.

Pro disertační výzkum byly vybrány následující druhy map s metodami vizualizace:

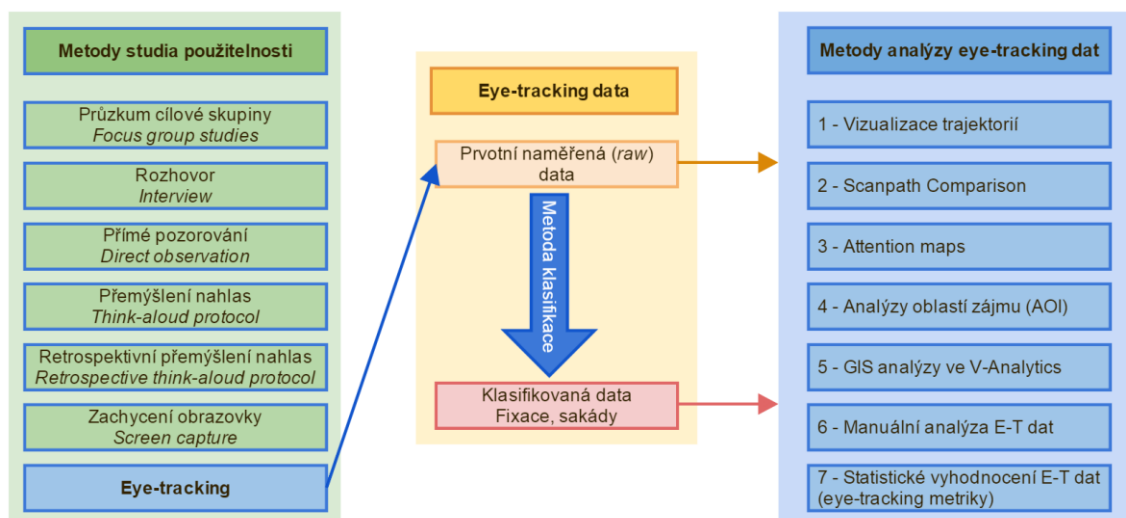
- Mapy reliéfu
 - Vrstevnice a barevná hypsometrie (2D)
 - Perspektivní pohled (3D)
 - Stínování (3D)
- Mapy městské zástavby
 - Zobrazení pomocí areálového znaku (2D)
 - Nefotorealistic 3D vizualizace (3D)
 - Fotorealistic 3D vizualizace (3D)
- Tematické mapy
 - 3D areálové mapy
 - Jednoduchý kartogram (2D)
 - Prostorový kartogram (3D)
 - Stínovaný kartogram (3D)
 - 3D bodové mapy
 - Bodové znaky zobrazené nad mapou (2D)
 - Bodové znaky zobrazené nad virtuálním glóblem (3D)

Dílčí cíle disertační práce byly řešeny následujícími metodami:

DC 1 – Rozbor vhodnosti metod analýzy eye-tracking dat

Eye-tracking je jednou z metod aplikovaných ve studiích použitelnosti (Li a kol., 2010) (zelená část obrázku 1). Výstupem z eye-tracking testování jsou prvotní (raw) data, která je možné klasifikovat na fixace a sáky (žlutá část obrázku 1). První část řešení dílčího cíle se věnuje popisu různých algoritmů pro jejich identifikaci a volbou nejvhodnějšího nastavení algoritmu I-DT (Dispersion Threshold Identification) pro kartografický výzkum. Výběr optimálního nastavení proběhl na základě vizuálního porovnání pozice identifikovaných fixací a prvotních (raw) dat. Tuto metodu doporučuje jako optimální Holmqvist v publikaci

„Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures“ (Holmqvist a kol., 2011). Na základě tohoto porovnání zvolil autor vlastní nastavení prahových hodnot algoritmu I-DT (podkapitola 4.1.2 a 4.1.3), které bylo použito ve všech experimentech v DC 2.



Obr. 1 Eye-tracking v systému metod studia použitelnosti, klasifikace eye-tracking dat a metody analýzy eye-tracking dat vhodné pro kartografický výzkum

Existuje velké množství metod analýzy eye-tracking dat. V modře označené části obrázku 1 jsou uvedeny skupiny metod vhodných pro kartografický výzkum. Z těchto skupin bylo vybráno 15 metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat, které byly detailně popsány a otestovány na úlohách s kartografickou tematikou. Následně bylo vytvořeno rozhodovací schéma pro volbu metody vhodné k analýze a vizualizaci různých typů eye-tracking dat. Expertním odhadem autora byla ohodnocena náročnost a rychlost použití jednotlivých metod.

Výsledkem DC 1 je popis 15 vybraných metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat (podkapitola 4.2), rozhodovací schéma pro výběr nejvhodnější metody a ohodnocení metod dle náročnosti a rychlosti použití (podkapitola 4.3).

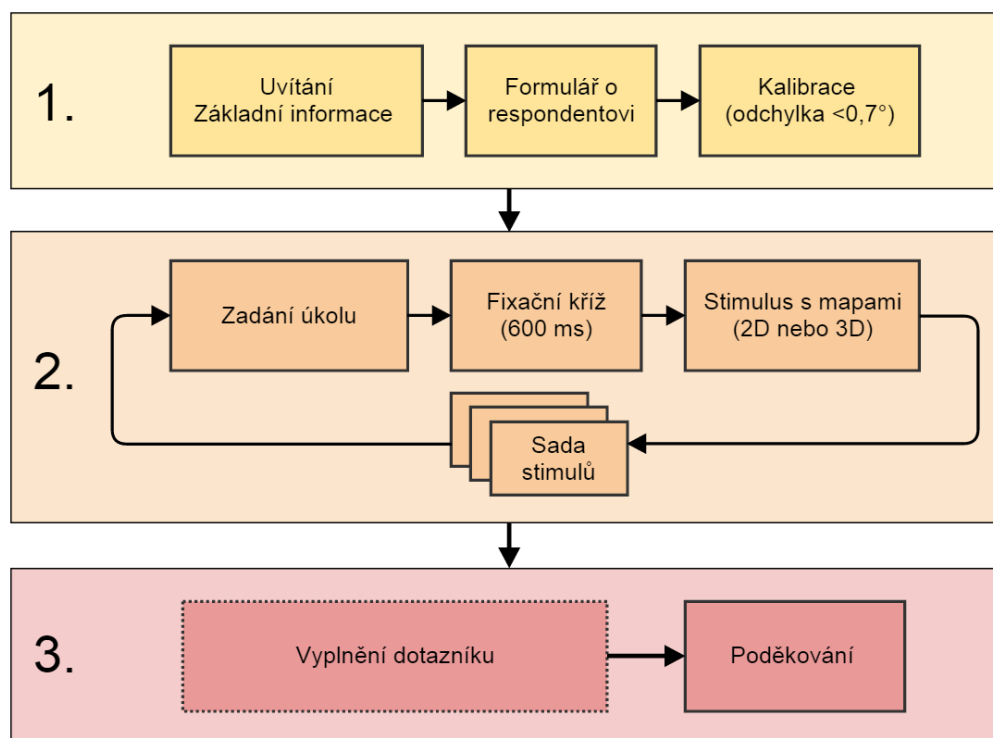
DC 2 – Návrh, sestavení, průběh a vyhodnocení E-T experimentů

Obsahem dalšího dílčího cíle (DC 2) byla analýza dat naměřených v sedmi eye-tracking experimentech doplněných o dotazníky. Data byla analyzována pomocí metod popsaných a otestovaných v DC 1. V experimentech byly porovnávány různé typy 2D a 3D kartografických vizualizací za účelem zjištění jejich vhodnosti pro uživatele při řešení určitých typů prostorových úloh.

Na začátku každého experimentu byly formulovány výzkumné hypotézy, které byly pomocí eye-tracking testování ověřeny. Podle těchto hypotéz byly poté vytvořeny testovací stimuly. V disertační práci se jednalo o statické obrázky v rozlišení 1680x1050 nebo 1920x1200 (dle použitého monitoru). Pro eye-tracking testování lze použít také video, snímání obrazovky nebo webovou stránku, to však pro řešení cílů práce nebylo vhodné.

Vlastní tvorba experimentu s volbou pořadí stimulů, délkou jejich prezentace, přípravou formuláře po případné odpovědi uživatelů atd. byla v některých případech doplněna o sestavení dotazníku pro zjištění subjektivního názoru respondentů na prezentované typy vizualizace (obr. 2). Na začátku každého testování vyplnil respondent ve formuláři několik informací o sobě (věk, pohlaví, kartografické vzdělání). Před spuštěním vlastního

experimentu byl kalibrován přístroj pro respondentovy oči tak, aby byl záznam co nejpřesnější (žlutá část obrázku 2). Po úspěšné kalibraci (odchylka $< 0,7^\circ$) se respondentovi zobrazilo zadání konkrétního úkolu. Poté došlo k velice krátkému (600 ms) zobrazení tzv. fixačního kříže, jehož účelem je nastavit stejnou počáteční pozici jednotlivých trajektorií. Nakonec byl respondentovi po určitý čas zobrazen vlastní stimulus. Poté následovala další otázka (oranžová část obrázku 2). Pokud to bylo výhodné, bylo zvoleno náhodné pořadí stimulů. V některých případech byl eye-tracking experiment doplněn o dotazník zaměřený na subjektivní názor respondenta na použité vizualizace. Tento dotazník respondent vyplnil ihned po skončení eye-tracking testování (červená část obrázku 2).



Obr. 2 Design eye-tracking experimentů

Eye-tracking experimenty byly v některých případech zaměřeny na zjištění rozdílného přístupu odborníků a laiků – kartografů a nekartografů. Pro tyto experimenty byl jako kartograf uvažován respondent, který úspěšně absolvoval minimálně dva ročníky studia na vysoké škole v oboru zaměřeném na kartografii. Nekartografové byli ve většině případů rovněž studenti, ovšem z oborů, kde se s kartografií nesetkají. Eye-tracking testování je časově náročné, proto se jako nejefektivnější jeví právě využití studentů jako respondentů.

Při tvorbě všech eye-tracking experimentů byl využit within-subject design experimentu. To znamená, že všichni respondenti viděli všechny stimuly experimentu. Protože byly porovnávány dvojice stimulů (2D a 3D), bylo nutné jeden ze stimulů ve dvojici upravit tak, aby bylo zamezeno efektu učení (respondent si nepamatoval odpověď z druhého stimulu ve dvojici). Tyto úpravy stimulů byly voleny tak, aby měly co nejmenší vliv na uživatele a bylo možné testovaný typ vizualizace (2D a 3D) porovnat.

Druhou variantou návrhu experimentu je tzv. between-subject design, kdy jsou respondenti rozděleni do dvou skupin a každé skupině je prezentován pouze jeden typ vizualizace. Odborná literatura (Bojko, 2013) se v otázce volby experiment designu rozchází a nedává jasné doporučení. Within-subject design byl zvolen na základě osobní konzultace autora s Kennethem Holmqvistem z Lund University. Kenneth Holmqvist se eye-trackingem

zabývá již od roku 1991, je autorem klíčové publikace v oboru (Holmqvist a kol., 2011), jeho pracoviště je nejlépe vybavené v Evropě a patří mezi nejlepší na světě.

Data naměřená v experimentech byla pomocí identifikačního algoritmu I-DT klasifikována na fixace a sádky. Nejvhodnější nastavení klasifikačního algoritmu bylo otestováno jako součást řešení DC 1. Následně byla pomocí metod popsaných a ohodnocených v DC 1 (podkapitola 4.2 a 4.3) analyzována naměřená data. V každém experimentu byly využity jak statistické analýzy eye-tracking metrik, tak i vhodné metody vizualizace. Metody použité pro analýzu konkrétních experimentů byly vybrány tak, aby co nejlépe popsaly zjištěné rozdíly mezi 2D a 3D vizualizací. Druhým kritériem pro volbu metody vizualizace bylo použití různých metod u různých experimentů tak, aby byly výsledky práce rozmanité.

Pro statistické hodnocení eye-tracking metrik byl ve většině experimentů využit dvouvýběrový Wilcoxonův test. Tento neparametrický test byl využit místo Studentova T-testu, protože ve většině případů neodpovídala sledovaná veličina Gaussovu normálnímu rozdělení.

DC 3 – Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii

Při řešení třetího dílčího cíle byly shrnuty zkušenosti s návrhem, průběhem a analýzou eye-tracking experimentů získané během tvorby práce. Na základě autorových zkušeností získaných při tvorbě disertační práce i při dalším eye-tracking výzkumu byla zformulována obecná i konkrétní doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu, tvorbu stimulů a nastavení experimentu.

2.2. Použité technické a programové vybavení

Pro eye-tracking experimenty bylo využíváno zařízení SMI RED 250 od společnosti SensoMotoric Instruments (SMI). SMI patří mezi nejvýznamnější výrobce zařízení pro sledování pohybu očí a přístroje od této společnosti jsou využívány v mnoha odborných studiích.

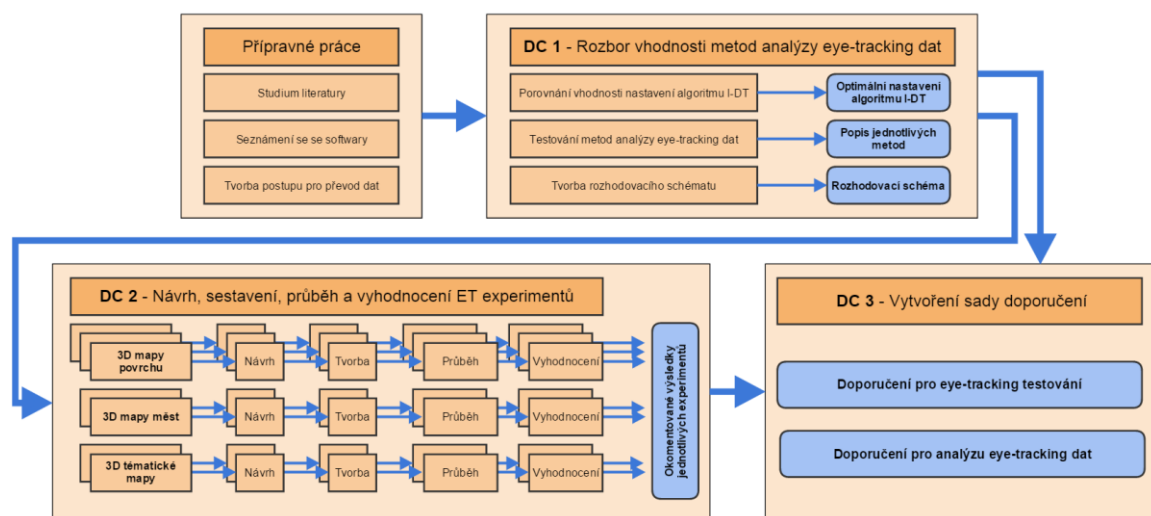
Zařízení SMI RED 250 patří do skupiny bezkontaktních eye-trackerů. Pracuje na principu detekce zornice a korneálního odrazu infračerveného světla. U většiny provedených eye-tracking experimentů byla snímací frekvence zařízení 120 Hz, což umožnilo snímání polohy oka každých 8 ms s prostorovou přesností 0,4°. U dvou eye-tracking experimentů zaměřených na hodnocení tematických map bylo využito snímání s frekvencí 250 Hz.

Pro přípravu eye-tracking experimentů byl využíván program Experiment Center od společnosti SMI. Program je součástí produktu SMI Experiment Suite 360° společně s aplikací SMI BeGaze pro zobrazení a základní analýzu naměřených dat. Tato aplikace však obsahuje pouze základní analytické nástroje. Z toho důvodu byla data pomocí nástroje COTOS (Kučera, 2014) převedena do open-source aplikace OGAMA. Využit byl také software V-Analytics (dříve označovaný jako CommonGIS). Pro převod dat z BeGaze do V-Analytics byl použit nástroj vytvořený Kristien Ooms z Ghent University. Statistická analýza výstupů byla provedena pomocí softwaru R. V práci byly využity i další specializované nástroje, jako je eyePatterns či GeoTime.

2.3. Postup zpracování

V první fázi tvorby disertační práce si autor osvojil základy práce s eye-trackerem, nastudoval si pravidla tvorby experimentů i testování, seznámil se s použitými programy a navrhl postup pro převod dat mezi jednotlivými aplikacemi. Poté sestavil první experimenty, čímž získal zkušenosti s testováním i analýzou eye-tracking dat. Při řešení DC 1 popsal metody analýzy eye-tracking dat vhodné pro kartografický výzkum a vytvořil rozhodovací schéma pro volbu těchto metod. Následně navrhl, provedl a vyhodnotil sedm experimentů zabývajících se 3D vizualizací v kartografii.

V závěru disertační práce autor vytvořil sady doporučení pro eye-tracking testování a vyhodnocení eye-tracking experimentů v kartografickém výzkumu. Postup řešení cílů disertační práce je znázorněn na obrázku 3.



Obr. 3 Postup řešení cílů disertační práce

3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tvůrci map, kartografové, vnímají mapy jinak než cílová skupina jejich uživatelů. Pokud není tvůrcem mapy profesionální kartograf, je do procesu tvorby mapy vnášena určitá míra subjektivity. I přes několikasetletou snahu kartografie o objektivizaci všech procesů tvorby map někdy kartograf nepostihne všechny detaily a situace užití map uživatelem, způsob jejího vnímání, čtení, analýzy a interpretace. Vedle toho chybí kartografům argumentace pro řadu jejich rozhodnutí při sestavování kompozice, tvorby znakového klíče či řešení kartografické generalizace. Z těchto důvodů jsou kartografická díla podrobována výzkumu uživatelské percepce.

Od 60. let 20. století není optimalizace tvorby map založena pouze na intuici kartografa. V této době se objevují první práce, ve kterých je vnímání mapy chápáno jako fenomén, jenž může být systematicky hodnocen vědeckými metodami (např. (Olson, 1979; Petchenik, 1977; Robinson a Petchenik, 1976)). Ty bývají označovány jako studie použitelnosti.

3.1. Studie použitelnosti

Termín „použitelnost“ (angl. usability) je definován podle standardu (ISO, 1998) jako „Efektivita, účinnost a spokojenost s prostředím, pomocí něhož uživatelé dosáhnou stanovených cílů“. ISO definice použitelnosti je založena na interakci člověka a počítače (Human-Computer Interaction, HCI) a ergonomickém designu pracoviště. V oblasti HCI je většinou největší pozornost věnována optimálnímu modelování systému. Oproti tomu v oblasti geografie a statistiky je důraz kladen spíše na podporu analýz zastoupených jevů (Dykes a kol., 2005).

Použitelnost je zastřešujícím pojmem pro řadu pojmů z těchto skupin: marketing, kvalita, software, percepce a kognice, aplikace (Wachowicz a Hunter, 2002). Použitelnost je definována jako kvalitativní atribut, který vyjadřuje, jak je konkrétní uživatelské rozhraní připraveno splnit požadavky uživatele z hlediska ovládní prostředí (Nielsen, 2012).

Existuje řada přístupů k výzkumu uživatelské percepce a hodnocení použitelnosti a efektivnosti kartografických děl. K odvození kvalitativních a kvantitativních charakteristik postojů uživatele vůči testovanému produktu (včetně map a vizualizací) je možné využít řadu evaluačních metod. Li (2010) zmiňuje sedm metod těchto studií použitelnosti (usability studies):

- Průzkum cílové skupiny (Focus Group Studies)
- Rozhovor (Interview)
- Přímé pozorování (Direct Observation)
- Přemýšlení nahlas (Think-aloud Protocol)
- Retrospektivní přemýšlení nahlas (Retrospective Think-aloud Protocol)
- Zachycení obrazovky (Screen Capture)
- Zaznamenávání a analýza pohybu očí (Eye-tracking)

Každá z metod studia použitelnosti má své výhody i nevýhody. Velice často dochází ke kombinaci jednotlivých metod (např. (Alacam a Dalci, 2009; Cutrell a Guan, 2007)).

Metody průzkumu cílové skupiny a rozhovoru využívají přímého kontaktu s uživatelem. Jsou založeny na cíleném kladení otázek a zaznamenávání diskuzí a reakcí jedince či skupiny na konkrétní produkt. Metoda přímého pozorování vede ke zjišťování chování

jedince v jeho přirozeném prostředí bez jakéhokoli ovlivňování pozorovatelem. Velmi důležitou metodou je hodnocení myšlení nahlas – tzv. “think-aloud”. Metoda spočívá ve verbalizování procesů, které uživatel provádí při řešení určitého problému. Účastníci studie slovně popisují nejen proces řešení konkrétních úkolů, ale také své pocity (Dykes a kol., 2005). Detailně se využitím této metody zabýval Van Someren (1994). Obdobou metody „think-aloud“ je její retrospektivní varianta, kdy pozorovatel popisuje způsob řešení testovacího úkolu až po jeho dokončení.

U výše zmíněných metod je problémem skutečnost, že si účastník není vědom všech procesů a že ne všechny procesy lze jednoduše vyjádřit slovy. Informace, které respondenti sdělí během rozhovoru nebo vyplní do dotazníku, nemusí odpovídat skutečnosti, přestože respondenti své odpovědi věří (Coltekin a kol., 2009). Kognitivní zátěž respondenta může být během think-aloud metody tak velká, že ovlivní jeho interakci s mapou. Oproti tomu s využitím sledování pohybu očí metodou eye-trackingu lze kognitivní zátěž spojenou se self-reportingem odbourat. Metodu eye-tracking lze považovat za objektivní, protože není ovlivněna názorem sledované osoby (Goldberg a Kotval, 1999).

3.2. Výzkum užití map (Map Use Research)

Díky masivnímu nárůstu produkce map během posledních let je nutné se zaměřit na výzkum užití map. Na základě výsledků tohoto výzkumu lze mapy upravit tak, aby lépe sloužily uživatelům. Elzakker tento výzkum rozdělil do dvou širokých a doplňujících se kategorií (van Elzakker, 2004).

- **Holistický výzkum funkce mapy** je založen na předpokladu, že mapa byla vytvořena za určitým účelem a že je vhodné zjistit, zda a do jaké míry konkrétní mapa tento účel splňuje. Tento typ výzkumu je holistický – zkoumá mapu jako celek. Zabývá se obsahem mapy, symbolizací a interpretací zobrazených jevů, kognitivním zpracováním a rozhodováním uživatele na základě této mapy.
- **V percepčním a kognitivním výzkumu map** je kladen důraz především na uživatele mapy. Kognitivní výzkum map zkoumá, jak mapy fungují. Je třeba jasně rozlišit rozdíl mezi percepcí a kognicí. Percepce označuje prvotní smyslové vnímání jednotlivých prvků mapy, zatímco kognice se zabývá nejen vnímáním pomocí smyslů, ale také myšlenkovými pochody, předchozími zkušenostmi a pamětí (Slocum a kol., 2009).

Jednu z prvních prací zabývajících se výzkumem čtení map publikovala Petchenik (1977). Ve své práci „Cognition in Cartography“ uvádí, že pro úspěšný přenos informace mezi kartografem a čtenářem mapy je nutné, aby čtenář mapu pochopil stejným způsobem, jakým ji autor vytvářel. Úkolem kognitivní kartografie je poznání, jakým způsobem uživatelé jednotlivé prvky mapy čtou a jak se liší přiřazený význam těchto prvků mezi jednotlivými uživateli. Petchenik dále uvádí, že v době vzniku článku (1977) nebyl na výzkum čtení mapy kladen dostatečný důraz.

Na tuto práci navazuje Olson (1979), která porovnává kognitivní psychologii a kognitivní kartografii a tvrdí, že kartografové mohou adaptovat myšlenky a metodiku experimentů od kognitivních psychologů. Stejně tak mohou psychologové ve svých studiích využívat mapu jako stimulus. Obě dvě disciplíny mohou zkoumat kognitivní procesy probíhající během čtení a porozumění mapy. Pro kognitivního psychologa je ale v centru zájmu myšlenkový proces a mapa je pouze nástroj. Pro kognitivního kartografa je důležitá především vlastní mapa.

Kognitivní kartografie zahrnuje i aplikaci kognitivních teorií a metod k pochopení map a využití map k porozumění kognice (Montello, 2002). Kognitivní kartografii je možné členit do tří základních výzkumných směrů:

- Psychologický výzkum percepce a kognice map
- Výzkum vedoucí k zlepšení designu map
- Výzkum map, jako prostředku pro zkvalitnění výuky (Montello, 2002)

V rámci světového výzkumu je nejrozšířenější studium percepce map za účelem zvýšení efektivity a přizpůsobení jejich designu potřebám konkrétních uživatelů. V současnosti jsou v rámci Mezinárodní kartografické asociace vyčleněny dvě komise, které se věnují uživatelské stránce map, metodám hodnocení efektivity map a jejich optimalizaci - Commission on Use and User Issues a Commission on Cognitive Visualization.

Tvorbou map s důrazem na uživatele se zabýval Porathe (2007). Hodnocení map pro krizové řízení bylo řešeno na Masarykově univerzitě v Brně (Konečný a kol., 2011; Kubíček a Kozel, 2010). Kubíček a Šašinka (2011) při hodnocení vizualizace nejistoty v mapách využili multivarietní testovací program.

S rozvojem techniky jsou studie použitelnosti stále častěji využívány také v oblasti webové kartografie a GIScience. Jedněmi z prvních byly například Medyckyj-Scott a Hearnshaw (1993) a Knapp (1995). Později se touto problematikou zabývali i (Eicher a kol., 2010; Haklay a Zafiri, 2007; Harrower, 2007; Komárková, 2007; Nivala a kol., 2008; Slocum a kol., 2001). Na použitelnost webových portálů s využitím fuzzy logiky byla zaměřena studie Huba a Zatloukala (2008).

Trojrozměrnou vizualizaci využívá stále větší počet aplikací a systémů, nicméně je stále známo velmi málo o tom, ve kterých případech a jak může být 3D vizualizace využita nejúčinněji (Wood a kol., 2005).

Ve výzkumném projektu na Institute of Cartography na ETH v Curychu hodnotil Haeberling (2003) vizuální proměnné používané v 3D mapách (úhel natočení kamery, vzdálenost kamery, směr osvětlení, nastavení oblohy a oparu). Schobesberger a Patterson (2007) porovnávali rozdíl mezi 2D a 3D mapami národního parku Zion v Utahu. Pro sběr dat užívali dvou metod. Informační cedule přímo v lokalitě a dotazníky pro návštěvníky. Z hlediska atraktivity se ukázala jako vhodnější 3D varianta mapy.

Dotazníků pro zjištění uživatelských preferencí mezi 2D a 3D mapami využili také Petrovič a Mašera (2004). Respondenti se v jejich studii měli rozhodnout, který typ mapy by využili pro řešení čtyř úkolů: měření vzdáleností, porovnávání výšek, určení směru k severu a hodnocení sklonu trasy. Autoři došli k tomu, že pro odhad výšky a směru jsou 3D mapy vhodnější než jejich 2D ekvivalenty. U měření vzdáleností měli uživatelé s 3D mapami problémy.

Savage (2004) hledala odpověď na otázku, jestli bude výhodné užití 3D perspektivního pohledu oproti tradiční 2D topografické mapě. Autorka ve studii rovněž využila dotazníků. Respondenti byli náhodně rozděleni do dvou skupin a řešili prostorové úlohy nad 2D nebo 3D mapou. Výsledky studie neodhalily žádnou výhodu využití 3D map pro otázky týkající se odhadu výšek. Navíc u otázek, kde nebylo nutné zjišťovat výšku objektů (např. měření vzdáleností), byla 3D varianta spíše nevýhodou.

Přestože byl eye-tracking poprvé využit pro hodnocení map a kartografických děl již na konci 50. let 20. století (Enoch, 1959), ve větší míře je využíván až v posledních deseti až

patnácti letech. Důvodem je klesající cena zařízení pro sledování pohybu očí a vývoj počítačové techniky, která umožňuje rychlejší a efektivnější analýzu naměřených dat.

Jednu z prvních souhrnných publikací věnující se aplikaci eye-trackingu v kartografii představil Steinke (1987). Shrnuje v ní výsledky tehdejšího výzkumu a vyzdvihuje důležitost rozlišovat percepci skupin uživatelů v závislosti na jejich věku a vzdělání. Zřejmě prvním eye-tracking výzkumem hodnotícím kartografické produkty byla studie Enocha (1959), kde byly jako stimuly využity jednoduché mapy kreslené na podkladu leteckého snímku.

Další kartografické studie využívající eye-tracking se objevily až po roce 1970, kdy v Ontariu proběhlo „Symposium on the Influence of the Map User on Map Design“. Po tomto sympoziu se o tuto problematiku začal zajímat Jenks (1970) a jeho kolegové a studenti z University of Kansas. Mezi ně patřil například Dobson, který ve své disertaci (Dobson, 1977) shrnuje, že analýza záznamu pohybu očí umožňuje komplexnější studium čtení mapy a sdělování informací než využití tradičních kartografických výzkumných technik. V závěru uvádí, že eye-tracking je užitečným nástrojem pro odhalení problémů týkajících se kognice mapy a jeho možnosti by měly být dále zkoumány.

Ukázkou komplexního výzkumu na poli kognice v kartografii je práce Alacama a Dalciho (2009), kteří porovnávali čtyři mapové portály (Google Maps, Yahoo Maps, Live Search Maps a MapQuest). Základním předpokladem studie bylo, že čím nižší je průměrná doba trvání fixací, tím intuitivnější je prostředí mapového portálu pro uživatele. Nejkratší průměrná délka fixací byla zjištěna u Google Maps.

Sara Fabrikant z University of Zurich ve Švýcarsku se s využitím eye-trackingu zabývala hodnocením série map vyjadřující vývoj daného jevu v čase (Fabrikant a kol., 2008) nebo uživatelskou kognicí meteorologických map (Fabrikant a kol., 2010). Na stejném pracovišti působí Arzu Coltekin, která představila způsob systematického sledování uživatelských strategií při používání interaktivních mapových prostředí (Coltekin a kol., 2010). Na základě srovnání jednotlivých Scanpath zjistila, že uživatelé v prostředí interaktivní mapy vykazují překvapivě podobné chování. Coltekin se zabývala také analýzou sekvencí fixací zaznamenaných při vizuální analýze dat (Coltekin a kol., 2010). Na ETH v Curychu pracuje Peter Kiefer, který využívá mobilní eye-tracker pro hodnocení uživatelské práce s mapou přímo v terénu (Kiefer a kol., 2012).

V belgickém Gentu se eye-trackingem zabývá Kristien Ooms, která hodnotí zejména vhodnost rozmístění popisů v mapě a rozdíly ve čtení mapy mezi odborníky a laiky (např. (Ooms a kol., 2011; Ooms a kol., 2014; Ooms a kol., 2012b))

Další aplikace eye-trackingu se objevuje ve studii Opacha a Nossuma (2011), kde je hodnocena efektivita použití animovaných kartografických znaků na mapách pro předpověď počasí. Oproti předpokladu autorů nebylo potvrzeno, že animované znaky pomohly při interpretaci informace. Všechny použité metriky prokázaly, že mezi vnímáním statických a animovaných map není statisticky významný rozdíl.

Mezi další kartografické studie, při nichž byl využíván eye-tracking, patří například (Brodersen a kol., 2002; Fuchs a kol., 2009).

Problematika 3D vizualizace v mapách byla doposud řešena pouze okrajově. Na State University of Texas se Fuhrmann (2009) zabýval hodnocením rozdílů ve vnímání tradiční topografické mapy a jejího 3D holografického ekvivalentu pomocí eye-tracking

experimentu. Úkolem respondentů bylo na navrhout mapě optimální trasu. Analýza eye-tracking metrik ukázala, že vhodnější je holografická varianta.

Jedinou komplexnější studií zabývající se eye-tracking hodnocením 3D map je diplomová práce Irvankoski (2012), zabývající se hodnocením vlivu tří typů vizualizace terénu na řešení čtyř úkolů s mapou (nalezení symbolu, porovnání výšky dvou bodů, výběr oblasti vhodné pro turistiku a hledání optimální trasy mezi dvěma body). Výsledky byly vyhodnoceny s využitím průměrné délky fixace. Nejkratší průměrná délka fixací byla zaznamenána u reliéfu znázorněného pomocí stínování, což naznačuje, že tato metoda je pro uživatele nejjednodušší.

Tabulka 2 shrnuje vybrané eye-tracking studie, které se zabývaly kartografickou tematikou. Jejich výčet zde samozřejmě není kompletní, uvedeny však byly co nejreprezentativnější případy. Kromě krátkého popisu tématu, kterým se studie zabývaly, jsou v tabulce uvedeny i metody analýzy naměřených dat.

Tab. 2 Souhrn vybraných eye-tracking studií s kartografickou tematikou

Studie	Popis	Metody
(Enoch, 1959)	12 respondentů	Average Fixation Duration Average Interfixation Distance
	Aerial maps	
(Dobson, 1977)	20 respondentů	Number of Fixations Total Viewing Time AOI
	Graduated symbol maps	- Location of Fixations - Viewing Time by Location - Number of Refixations
(Brodersen a kol., 2002)	10 respondentů	Scanpath Length AOI
	Mapy 1 : 25 000 Hledání prvku v mapě	- Observation Length - Fixation Duration (3D) Gridded AOI - Dwell Time
(Alacam a Dalci, 2009)	26 respondentů	ANOVA AOI
	4 různé webové mapy	- Observation Length - Fixation Length
(Coltekin a kol., 2009)	30 respondentů	Scanpath (kvalita) Completion Time AOI
	Porovnání interface dvou online map	- Time to First Fixation - Time to First Click - Fixation Length
(Fuchs a kol., 2009)	21 respondentů	Number of Fixations Length of Fixations
	Povodňové mapy	Number of Saccades Span of each Saccade
(Fuhrmann a kol., 2009)	38 respondentů – experti vs. laici	Average saccade amplitude Average Fixation Duration Saccade/Fixation ratio
	Mapa města vs. Hologram Nejvyšší bod, plánování cyklotrasy	Average Pupil Diameter Traversed eye-path
(Ooms a kol., 2010)	14 respondentů	Scanpath (Time intervals)
	Hledání popisu na mapě	Response Time

(Coltekin a kol., 2010)	30 respondentů	Fixation Count Fixation Duration Time to First Fixation String-edit distance
	Map interface	
(Opach a Nossum, 2011)	10 respondentů	Scanpath HeatMaps AOI
	Semistatické vs dynamické mapy	- Fixation Count - Observation Length - Time to First Fixation
(Nossum a Opach, 2011)	Dynamické mapy	Space-Time-Cube
(Kiefer a kol., 2012)	5 respondentů	AOI
	Mobilní eye-tracker (brýle) Papírové mapy v ruce	Attention maps
(Irvankoski, 2012)	31 respondentů	Fixation Duration Number of Fixations Saccade Duration Saccadic Amplitude
	Hodnocení tří typů vizualizace terénu	
(Incoul, 2013)	32 respondentů	HeatMaps Gridded AOI
	Papírové vs digitální mapy Hledání popisu na mapě	- SearchTime - Fixation Count - Fixation Duration 3D Gridded AOI
(Krassanakis a kol., 2013)	32 respondentů	Heatmaps
	Dynamický symbol v mapě	Comparison with saliency model
(Nevelsteen, 2013)	45 respondentů	Luminance maps
	StreetView	
(Ooms a kol., 2014)	12+12 respondentů, experti vs. laici	Average Fixation Duration Fixations/second ANOVA HeatMaps Gridded AOI
	Topografické mapy Vliv změny barvy na čtení mapy	- Fixation Count - Fixation Duration (Dwell) 3D Gridded AOI Scanpath Visualization

3.3. Eye-tracking

Pohyby očí je možné exaktně měřit a na jejich základě studovat širokou škálu psychologických a biologických procesů (Wade a Tatler, 2005). V současné době patří eye-tracking mezi hlavní trendy v kartografii, o čemž svědčí například počet příspěvků na toto téma na mezinárodní kartografické konferenci ICC 2013 v Drážďanech.

3.3.1. Charakteristika lidského oka

Zrak je u lidí nejsilnější a nejvíce využívaný smysl. Obě oči poskytují zhruba eliptický obraz prostoru o úhlovém rozpětí přibližně 200° na šířku a 130° na výšku (Biedert a kol., 2010). Lidské oko však může v daný okamžik vnímat jen omezenou část prostoru. Více než 40 % lidského mozku zpracovává informace z oblasti pokrývající méně než 5 % zorného pole (Hoffman, 2000; Ware, 2010). To je způsobeno nestejnou strukturou sítnice. Fovea, jedna z částí sítnice, je zodpovědná za ostré přímé vidění (rovněž označováno jako foveální vidění). Fovea je ohraničena parafoveálním pásem a vnější perifoveální oblastí (Iwasaki a Inomata, 1986). Vnímání obrazu těmito částmi sítnice se nazývá periferní vidění, které je v porovnání s foveálním viděním rozmazané. To je důvodem, proč se oči neustále různými způsoby pohybují – reagují na příkazy z různých oblastí mozku.

Jeden z nejdůležitějších pohybů očí není ve své podstatě pohyb. Jedná se spíše o schopnost udržet oko zaměřené na určitý bod. Tento pohyb oka se označuje jako **fixace**. Vizualní vjem se skládá z řady fixací, zaměřených na jednotlivé prvky sledované scény. Pro přesun z jedné fixace na další provádějí oči rychlé balistické pohyby označované jako **sakády**. Sakády představují nejrychlejší pohyb části lidského těla. Rotační rychlost velkých sakád dosahuje až 500°/s. Během sakád lidský mozek nevnímá téměř žádné vizuální vjemy. Tento fakt není způsoben pouze rozmazáním vnímaného obrazu, ale také nervovým procesem označovaným jako sakadické potlačení neboli saccadic suppression (Hammoud a Mulligan, 2008).

Během fixací není oko v absolutním klidu, nýbrž vykonává tři typy mikropohybů – tremor, mikrosakády a drift. Jejich funkcí je zabránit efektu saturace receptorů na sítnici, který by vedl ke slábnutí vnímání. Lidé si těchto drobných pohybů nejsou vědomi (Biedert a kol., 2010).

Mezi další pohyby oka patří nystagmus, smooth pursuit a speciální typy sakád – glisády nebo tzv. square-wave jerk. Tyto pohyby je možné zaznamenat pouze s využitím vysokofrekvenčních eye-trackerů. Jejich snímání se využívá v klinických studiích zabývajících se například autismem (van der Geest a kol., 2001). Pro účely kartografie nebylo doposud zjištěno žádné využití sledování těchto mikropohybů.

Ze záznamu pozice oka, konkrétně pozice vizuální osy oka, tj. linie procházející středem zornice a středem fovey, je pro většinu analýz nutné identifikovat pomocí určitého algoritmu fixace a sakády (další pohyby se většinou neuvažují). Identifikace fixací a sakád představuje statistický popis chování pozorovaného oka. Na základě číselných charakteristik fixací a sakád se určuje vztah pozorovatele vůči sledovanému obrazu, obtížnost podávané informace, pozornost uživatele a další parametry čtení obrazu.

Brodersen (2002) přistupoval k měření pohybu očí na základě několika charakteristik. Podle něj fixace dlouhého trvání poukazuje na nedostatek relevantních podnětů nebo na skutečnost, že se oko setkalo s obtížnou informací, jejíž dešifrování vyžaduje delší čas. Podle

řady studií (např. (Biedert a kol., 2010; Brodersen a kol., 2002; Nielsen a Pernice, 2010)) je nová fixace zaznamenána v případě, že délka jednoho pohledu přesáhne 100 ms. Počet fixací indikuje úsilí ve vyhledávání relevantních objektů, přičemž vysoký počet fixací znamená, že uživatel musí identifikovat mnoho objektů, než najde požadovaný cíl.

3.3.2. Sledování pohybu očí

Počátek studia sledování pohybu očí není snadné určit. Carmichael (1926) považuje za jednoho z prvních, kteří se vědecky zabývali sledováním pohybu očí, Charlese Bella. Ten v roce 1823 popsal pohyby očních svalů a rozdělil pohyby očí na aktivní a pasivní (Bell, 1823). Díky tomu, že jeho práce propojuje pohyby (očních) svalů, smysly a mozkové funkce, bývá Bell označován jako otec fyziologické psychologie (Wade a Tatler, 2005).

Hammoud a Mulligan (2008) uvádějí jako počátek vědeckého studia pohybu očí začátek 19. století, kdy byla vyvinuta řada metod měření pohybu očí. Některé z těchto metod byly založené na mechanickém přenosu informace o poloze oka (Delabarre, 1898), jiné využívaly studia fotografií (Dodge a Cline, 1901).

Po druhé světové válce, v roce 1947, proběhlo jedno z prvních měření směru pohledu. Výzkum se zaměřil na chování armádních pilotů při přistávání letadel a byl realizován prostřednictvím analýzy videozáznamu s více než 500 000 filmovými políčky (Fitts a kol., 2005).

V 70. letech 20. století se většina prací zaměřila na technická vylepšení eye-trackerů, která měla za cíl především zvýšení jejich přesnosti (Mohamed a kol., 2007). Vzniklo několik velice přesných technik měření pohybu očí; některé z nich nebyly doposud z hlediska přesnosti měření překonány. Jednalo se především o:

- Využití elektrod umístěných v okolí oka (Electrooculography, EOG)
- Využití magnetické cívky (Magnetic search coil)
- Využití dual Purkinje image tracker

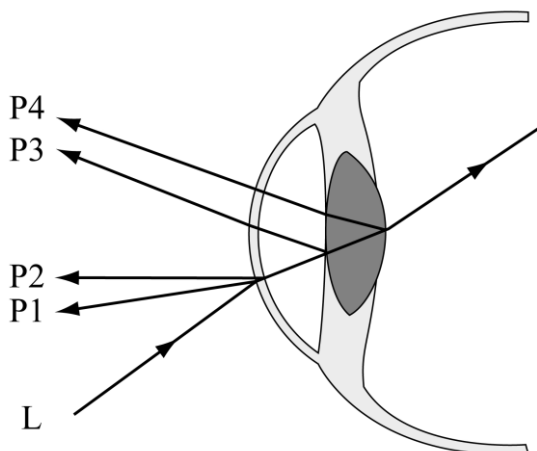
Princip elektrookulografie (EOG) spočívá v měření rozdílů elektrického odporu kůže pomocí elektrod umístěných kolem očí. Zaznamenáváním poměrně malých rozdílů v kožním odporu byl vypočítán pohyb očí. Jednou z výhod EOG je možnost měřit i pohyb zavřených očí. Toho se využívá například v klinických studiích zaměřených na oční pohyby během spánku. Ze třech výše zmíněných metod je EOG nejméně přesná (Yarbus a kol., 1967).

Technologie využívající magnetické cívky (Magnetic search coil) patří naopak k velice přesným. Jejím průkopníkem byl Barlow (1984), který si do oka umístil kapku rtuti. Později se využívalo smyčky drátu nebo speciálně upravených kontaktních čoček. Poloha a orientace této cívky (a tím pádem i oka) se vypočítá pomocí měření proudů indukovaných třemi navzájem kolmými zdroji magnetického pole (Hammoud a Mulligan, 2008).

Nejpřesnější metodou měření pohybu očí je Dual Purkinje Image (DPI) tracker. Tato bezkontaktní metoda využívá prvního a čtvrtého Purkyňova obrázku - odrazů světelného paprsku od různých částí oka. Jejich objevitelem byl Jan Evangelista Purkyně a v angličtině bývají označovány jako Purkinje images.

Existují minimálně čtyři viditelné Purkyňovy obrázky (obr. 4). První Purkyňův obrázek (P1) představuje odraz od vnější strany rohovky. Druhý (P2) je odrazem od její vnitřní

strany. Třetí (P3) je odrazem od přední strany čočky a poslední (P4) je odrazem od její zadní strany (Glenstrup a Engell-Nielsen, 1995).



Obr. 4 Čtyři Purkyňovy obrázky, odrazy světelného paprsku (L) na různých částech oka: P1 od vnější strany rohovky, P2 od vnitřní strany rohovky, P3 od přední strany čočky a P4 od zadní strany rohovky (Popelka a kol., 2012)

DPI využívá velice rychlých servomotorků ke sledování prvního a čtvrtého Purkyňova obrázku. Jedná se o plně analogové zařízení, které je velice přesné a polohu oka snímá s velkou frekvencí. Na druhou stranu je ale nutná stabilizace hlavy a časově náročná příprava respondenta a zařízení. Z tohoto důvodu jsou tato zařízení, přestože z hlediska frekvence a přesnosti nebyla překonána, využívána spíše pro ověření přesnosti moderních eye-trackerů než pro samotné testování respondentů.

Většina moderních eye-trackerů, tedy zařízení schopných zaznamenávat pohyb očí, je založena na principu bezkontaktního snímání zornice a korneálního odrazu (Holmqvist a kol., 2011). Tato metoda bývá označována jako Pupil and Corneal Reflection Tracking. Její princip spočívá v detekci středu zornice a korneálního (kornea = rohovka) odrazu přímého paprsku infračerveného světla. Korneální odraz je pouze jiné označení pro první Purkyňův obrázek (Holmqvist a kol., 2011).

Eye-tracker je nejčastěji umístěn pod monitorem, na kterém je zobrazován studovaný obraz (stimulus). Součástí tohoto zařízení je jedno nebo více infračervených světel, které svítí směrem na uživatele. Zařízení také obsahuje kameru, která snímá uživatelské oči. Ta na základě rozpoznávání obrazu nalezne střed zornice a odraz infračerveného světla. Ze vzájemné polohy těchto dvou bodů zařízení vypočítá směr pohledu (Point of Regard).



Obr. 5 Snímek z kamery umístěné na eye-trackeru. Bílým křížem je označen střed zornice, černým korneální odraz.

Směr pohledu bývá nejčastěji ukládán v souřadnicích studovaného obrazu (stimulu). Společně s dalšími údaji (např. velikost zornice) je možné jej zobrazit jako textový soubor a z těchto dat následně vypočítat umístění fixací, vizualizovat trajektorii pohledu atd.

Kromě výše popsaného typu zařízení existují i další typy eye-trackerů. Jednotlivé typy se od sebe liší vzorkovací frekvencí a přesností určení bodu pohledu. Důležitým parametrem přístroje je frekvence, která určuje, kolikrát za vteřinu je poloha oka zaznamenána. Volba určitého typu přístroje musí respektovat účel aplikace, pro kterou je přístroj využit.

Speciálním typem využívaným především v klinických studiích jsou vysokorychlostní eye-trackery, které umožňují zaznamenávat polohu oka s frekvencí až 2 000 Hz. Při jejich využívání je nutná fixace hlavy. Existují také mobilní eye-trackery, které má uživatel přímo na hlavě (buď jako brýle nebo umístěné na přilbě). Ty jsou využívány při studiích, kde je sledováno chování uživatele přímo v terénu (např. (Kiefer a kol., 2012)).

Eye-tracking je využíván v mnoha oblastech. Nejčastější jsou psychologické studie, lékařství, HCI (Human-Computer Interaction), marketing, biometrika a také studie použitelnosti.

3.4. 3D geovizualizace

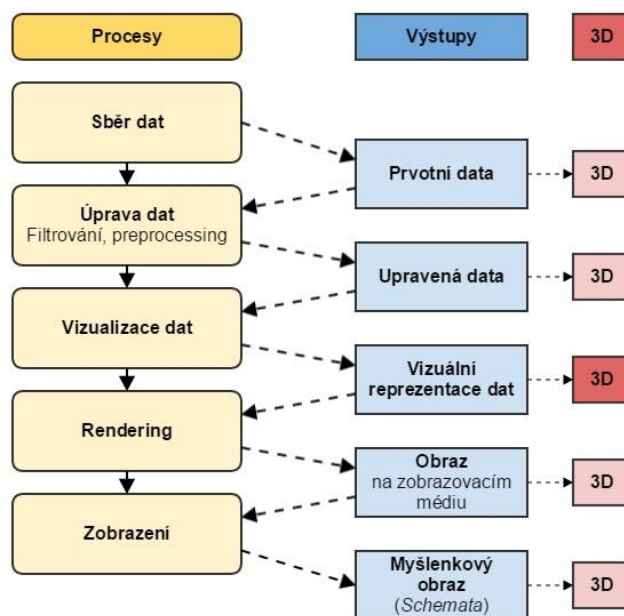
Bleisch (2012) definuje 3D geovizualizaci je velmi obecný termín, který se používá pro 3D vizualizace reprezentující skutečný svět, jeho část, nebo jevy s prostorovou referencí (Herman, 2014). 3D geovizualizace se staly velmi populárními díky rozšíření virtuálních glóbulů, jako např. Google Earth. Velká část 3D geovizualizací je zaměřena na zobrazování krajiny s využitím digitálního modelu terénu překrytého ortofotosnímky a doplněného více či méně realistickými modely měst a dalších objektů (Bleisch, 2012). Podobné reprezentace krajiny byly vytvářeny i před nástupem digitálních technologií, kdy byly fyzické 3D modely vytvářeny ručně ze sádry nebo dřeva (Haerberling, 2002). Dnes jsou k tvorbě fyzických 3D modelů často využívány 3D tiskárny. Takto vytvořené fyzické 3D mapy je možné využít například pro nevidomé (Kozáková a Voženilek, 2009), nebo jako podklad pro uživatele, kteří jsou zodpovědní za rozhodovací procesy, ale nemají dostatečné zkušenosti s mapami (Rase, 2007).

Tyto perspektivní pohledy na krajinu bývají označovány jako 3D mapy. Přestože tento pojem není v kartografické literatuře zakotven, Haerberling (2002) uvádí důvody, proč je možné je takto označovat. První část názvu, tedy „3D“, protože vytvořená krajina je lidským zrakem vnímána jako trojrozměrná, přestože je zobrazena na 2D ploše monitoru. Druhá část názvu, tedy „mapa“ může být použita, protože tyto produkty zobrazují prostorové jevy na podkladu digitálního modelu terénu s využitím kartografické generalizace a jazyka mapy.

3D geovizualizace se neomezuje pouze na zobrazení terénu, kdy osa Z představuje nadmořskou výšku. Velice často dochází k zobrazení vývoje jevu v čase, například pomocí Space-Time-Cube (Hägerstrand, 1970; Kraak, 2008; Popelka a Vozenilek, 2013). Kromě času je možné na ose Z zobrazit například cenové mapy (Rase, 2007), hustotu zalidnění (Wood a kol., 1999), množství kriminálních činů (Wolff a Asche, 2009) a mnoho dalších jevů.

Existuje několik pohledů na označení „3D“. Při objasňování tohoto termínu vycházel Wood (2005) z tzv. „Visualization pipeline“ (procesu vizualizace dat), která byla představena na konci 80. let 20. století (Haber a McNabb, 1990; Upson a kol., 1989). Podle nich je možné rozlišit pět úrovní dimenzionality, které odpovídají jednotlivým fázím procesu vizualizace dat. V každé fázi procesu vzniká určitý druh výstupu, jak je vidět na

obrázku 6. Termín 3D bývá obvykle spojován s fází „Vizuální reprezentace dat“, ale může být také součástí výstupů všech ostatních fází procesu. Posledním článkem „Visualization pipeline“ je vytvoření myšlenkového obrazu (anglicky Schemata (MacEachren, 2004)), neboli uživatelská percepce.



Obr. 6 Visualization pipeline (upraveno podle (Wood a kol., 2005))

Využívání 3D geovizualizace má své výhody i nevýhody. Mnoho uživatelů není zvyklých pracovat s mapou. Problémy mají zejména s topografickými mapami, na kterých je terén znázorněn vrstevnicemi. Tito uživatelé mohou využívat 3D mapy, ze kterých jednodušeji získají představu o výškových poměrech (Schobesberger a Patterson, 2007). 3D mapy jsou vizuálně příjemné a názorné. Jejich hlavní výhodou je, že 3D obsah může hrát důležitou roli v přenosu informací a získávání znalostí o zobrazeném území (Sieber a kol., 2013). S využitím 3D geovizualizace je možné na stejné ploše (obrazovce) zobrazit větší množství informací (Card a kol., 1991). 3D mapy mohou být chápány jako spojovací prvek mezi dvoudimenzionální abstrakcí a realitou (Jobst a Germanchis, 2007).

Podle Haeberlinga (2005) se 3D mapy uživatelům líbí, protože jim připomínají reálnou krajinu pozorovanou například z letadla. Jejich potenciál vidí především jako doplněk k tradičním ortogonálním mapám.

Mezi nevýhody statických 3D map patří především překrytí níže položených objektů vyššími a zkreslení vzdáleností. Tvorba 3D map je také časově i technicky náročnější. U interaktivních map, kterými je možné pohybovat a otáčet, může u nezkušených uživatelů docházet k problémům s ovládáním prostředí pomocí myši (Wood a kol., 2005).

Haeberling (2002) konstatuje, že neexistuje téměř žádná kartografická teorie a principy pro tvorbu 3D map. Góralski (2009) ve své disertační práci taktéž tvrdí, že solidní znalosti z oblasti 3D kartografie stále chybí. Podobný názor je možné najít i v dalších studiích (např. (Ellis a Dix, 2006; MacEachren, 2004; Slocum a kol., 2001; Wood a kol., 2005)). Autoři uvádějí, že je stále známo velmi málo o tom, ve kterých případech a jak může být 3D vizualizace využita nejučinněji. Dále dodávají, že je v této oblasti nutné provést vhodné hodnocení použitelnosti 3D map.

U většiny výše popsaných způsobů 3D geovizualizace se nejedná o pravé 3D, ale spíše o tzv. pseudo 3D (nebo 2,5D – každé souřadnici X a Y odpovídá právě jedna hodnota Z). Za tu je nejčastěji považována metoda perspektivního promítání (Dušek a Miřijovský, 2009; Wood a kol., 2005). Dle Kraaka (1988) je pojem pravé 3D používán v těch případech, kdy jsou pro dosažení realistického 3D vjemu využity speciální pomůcky. Mezi ty je možno zahrnout 3D LCD monitory, holografické technologie, stereoskopické obrazy, anaglyfy nebo fyzické modely (Buchroithner, 2012).

Hodnocení práce s pravými 3D modely pomocí dostupné eye-tracking technologie by bylo technicky velice náročné. V disertační práci jsou proto testovány pouze metody 3D vizualizace, kdy je obraz promítán na plochu monitoru. Z mnoha oblastí, ve kterých je možné 3D geovizualizaci využít, byly vybrány ty, ve kterých je využití 3D map nejčastěji využíváné, nebo ty, kde je smysluplné testovat jejich vhodnost oproti běžným 2D mapám. Z tohoto důvodu nebyly vybrány například mapy horských středisek a sjezdovek, kde je 3D vizualizace využívána téměř ve všech případech.

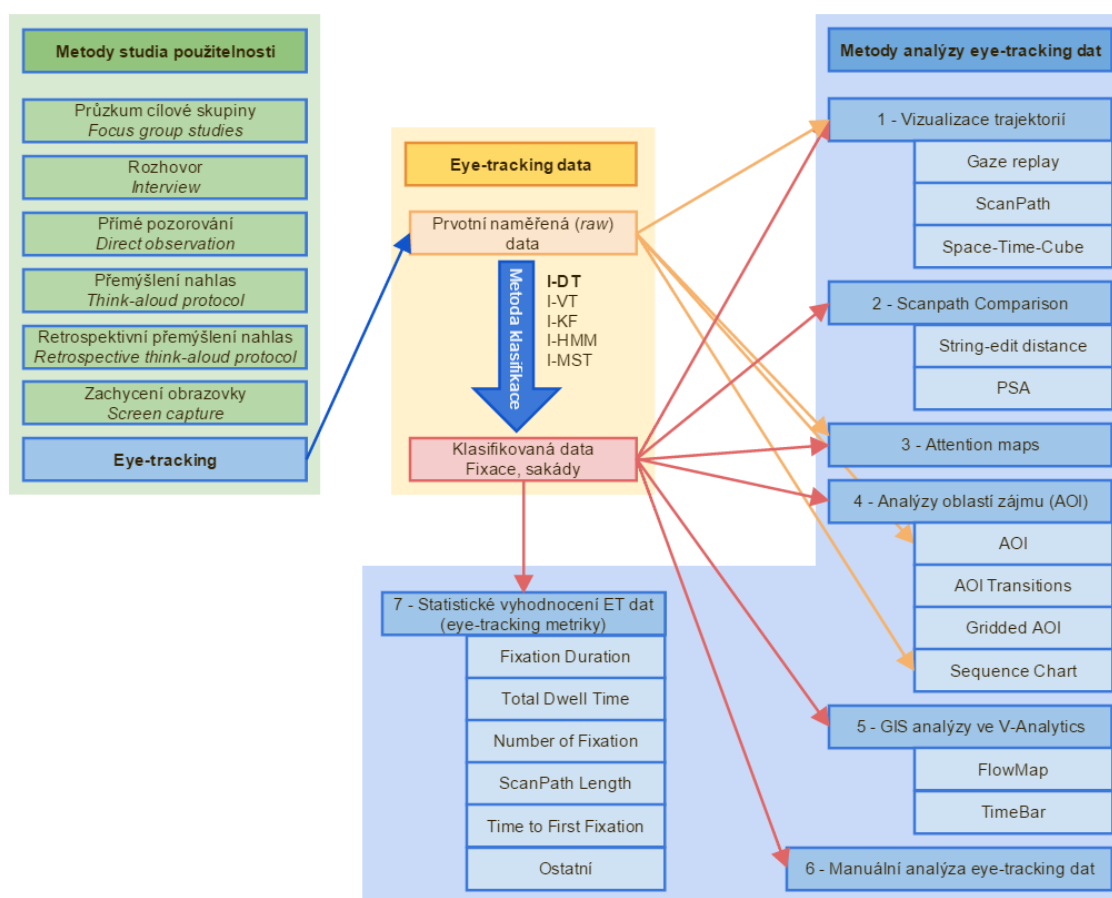
Pro eye-tracking hodnocení byly vybrány tyto tři kategorie 3D map:

- Mapy reliéfu
- Mapy městské zástavby
- Tematické mapy

4. DC 1 - HODNOCENÍ METOD ANALÝZY EYE-TRACKING DAT

Data o pohybu očí jsou ve své podstatě data časoprostorová. Pro jejich analýzu je možné využívat metody známé ze studií, které se zabývají daty s časovou a prostorovou složkou (např. (Andrienko a Andrienko, 2013; Andrienko a Andrienko, 2006)). Přesto má analýza eye-tracking dat svá specifika.

Existuje velké množství metod analýzy eye-tracking dat. Ne všechny jsou ale vhodné pro analýzu kartografických dat. Svá specifika mají metody využívané například ve zdravotnictví, psychologii nebo při analýze čtení textu. Hodnocení použitelnosti je pouze jedna z dílčích oblastí, ve které je eye-tracking využíván. V této kapitole je popsáno celkem 15 metod analýzy eye-tracking dat, které jsou vhodné pro kartografické účely (modrá část obrázku 7). Metody byly vybrány na základě zkušenosti autora a řešerše kartografických publikací zabývajících se eye-trackingem. Souhrn metod analýzy eye-tracking dat používaných v kartografii je obsažen v tabulce 2 na straně 18. Vybrané metody byly rozděleny do sedmi kategorií. Nejjednodušším způsobem analýzy eye-tracking dat jsou různé způsoby vizualizace trajektorií (1). Trajektorie jednotlivých respondentů nebo jejich skupin je možné porovnávat metodami Scanpath Comparison (2). Další kategorie agregují data více uživatelů do jednoho výstupu. Jedná se o Attention maps (3) a analýzu oblastí zájmu (4). Popsány jsou také metody analýzy probíhající v GIS software V-Analytics (5). Především pro analýzu dat naměřených nad dynamickým stimulem je vhodná metoda manuální analýzy dat (6). Poslední velkou kategorií je statistická analýza eye-tracking metrik (7).



Obr. 7 Eye-tracking v systému metod studia použitelnosti a metody hodnocení eye-tracking dat

Přestože některé ze zmíněných metod analýzy lze použít i pro analýzu prvotních naměřených dat (raw data), všechny zmíněné metody pracují i s daty klasifikovanými na fixace a sakády. Ve většině případů je využití klasifikovaných dat vhodnější. Proto bylo nutné vhodně zvolit klasifikační algoritmus a jeho nastavení (žlutá část obrázku 7). Výběr tohoto nastavení je obsahem kapitoly 4.1. Následně jsou popsány jednotlivé metody analýzy a zmíněny jejich výhody a nevýhody (kapitola 4.2). V závěru kapitoly je představeno rozhodovací schéma pro volbu nejvhodnější metody analýzy eye-tracking dat (kapitola 4.3).

4.1. Hodnocení metod identifikace fixací a sakád

Ve všech eye-tracking studiích je velice důležitá volba a nastavení metody identifikace fixací a sakád, protože toto nastavení může ovlivnit výsledky studie. Důležité je také zvolené nastavení ve studii popsat, protože bez této informace nelze výsledky srovnávat s ostatními pracemi.

Eye-tracker SMI RED 250 ukládá naměřená E-T data do formátu *.IDT. Pomocí aplikace SMI BeGaze je možné tato data uložit do textového dokumentu ve formě *.txt. Exportovat lze surová (raw) data i identifikované fixace a sakády.

Exportovaná data obsahují časovou značku a s ní související parametry očí. Jedná se především o polohu pohledu (Point of Regard, POR) ve směru osy X a Y. Tato hodnota je udávána v pixelech použitého monitoru a pro většinu studií včetně aplikace v kartografii je tato hodnota nejdůležitější. Mezi další parametry patří například velikost zornice, pozice středu zornice, pozice a úhel natočení hlavy, pozice korneálního odrazu a další. Ukázka vyexportovaných raw dat je v tabulce 3. Tabulka obsahuje pouze časovou značku (Time), souřadnice pozice pohledu levého oka (L POR X, L POR Y) a název obrázku, který se k daným datům vztahuje (Stimulus). Tato data mohou být v aplikaci SMI BeGaze (případně pomocí dalších nástrojů, např. EMD (Komogortsev a kol., 2010), OGAMA a další) klasifikována na fixace a sakády. Ukázka takto klasifikovaných dat je v tabulce 11. U každé fixace nebo sakády je uvedena časová značka jejího začátku a konce (Start, End), dále délka trvání v mikrosekundách (Duration) a souřadnice v pixelech. U sakád jsou zde uvedeny souřadnice začátku i konce.

Tab. 3 Vyexportovaná prvotní naměřená (raw) data

Time	Trial	L POR X [px]	L POR Y [px]	Stimulus
2864092592	1	842,89	543,96	010 - 3d.jpg
2864100960	1	845,4	543,45	010 - 3d.jpg
2864109212	1	843,58	544,34	010 - 3d.jpg
2864117593	1	838,73	542,74	010 - 3d.jpg
2864125956	1	839,69	544,45	010 - 3d.jpg
...

U prvotních (raw) dat i u klasifikovaných dat lze vyexportovat i velké množství dalších parametrů (např. velikost zornice, corneal reflex, amplituda sakády, průměrné zrychlení sakády a další), ty však nejsou v kartografii využívány, a proto nejsou ani v tabulkách 3 a 4.

Tab. 4 Eye-tracking data klasifikovaná na fixace a sakády

Event	Trial	Start	End	Duration	StartX	StartY	EndX	EndY
Fixation	1	2864092592	2864850875	758283	842.69	519.71		
Saccade	1	2864850875	2864875886	25011	844.16	489.87	614.32	473.56
Fixation	1	2864875886	2865475793	599907	577.39	437.20		
Saccade	1	2865475793	2865509248	33455	586.56	455.07	944.04	679.79
Fixation	1	2865509248	2865717480	208232	965.64	687.75		
Saccade	1	2865717480	2865742492	25012	963.91	682.63	966.17	689.33
Fixation	1	2865742492	2865867448	124956	968.57	687.98		
Saccade	1	2865867448	2865900782	33334	970.97	674.98	1061.58	455.91
Fixation	1	2865900782	2866117401	216619	1059.43	451.11		
...

4.1.1. Algoritmy identifikace fixací a sakád

Fixace je možné identifikovat manuálně (Harris a kol., 1988), ale existuje také velké množství klasifikačních algoritmů. Komogortsev (2010) zmiňuje několik studií, které se těmito algoritmy zabývaly (např. (McConkie, 1981; Salvucci a Goldberg, 2000; Sauter a kol., 1991)). Mezi nejčastěji používané patří algoritmy I-VT (Velocity Threshold Identification) a I-DT (Dispersion Threshold Identification).

Tab. 5 Porovnání algoritmů I-VT a I-DT (upraveno podle (Salvucci a Goldberg, 2000))

Metoda	Přesnost	Rychlost	Robustnost	Jednoduchost	Počet parametrů
I-VT	✓	✓✓	✗	✓✓	1
I-DT	✓✓	✓	✓✓	✓	2

Legenda: ✓✓ = velmi dobré, ✓ = dobré, ✗ = špatné

V případě využívání algoritmu **I-VT** (Velocity Threshold Identification) se v naměřených datech pro každou pozici oka vypočítá rychlost pohybu. Tato rychlost je poté porovnána s nastavenou prahovou hodnotou. Pokud je naměřená rychlost vyšší než prahová hodnota, je tento záznam označen jako část sakády. V opačném případě je označen jako část fixace. Primárním typem pohybu, který tento algoritmus detekuje, jsou sakády. Jako fixace jsou označeny úseky dat mezi nalezenými sakádami (Salvucci a Goldberg, 2000). Algoritmus I-VT je využíván pro data naměřená s frekvencí 250 Hz a vyšší (Holmqvist a kol., 2011).

Pro data naměřená s nižší frekvencí se nejčastěji využívá algoritmu **I-DT** (Dispersion Threshold Identification). Data v případových studiích disertační práce byla naměřena pomocí zařízení SMI RED 250, jehož vzorkovací frekvence je 120 Hz. Z toho důvodu byl pro detekci fixací a sakád využit právě algoritmus I-DT, který je implementován v aplikaci BeGaze, jež byla dodána spolu se zařízením, a který je pro analýzy dat s nižší frekvencí (<250 Hz) vhodnější.

I-DT algoritmus vyžaduje dva parametry – prahovou hodnotu pro rozptyl (Dispersion) a délku trvání fixace (Duration). Hlavní nevýhodou tohoto algoritmu je vzájemná vysoká závislost těchto dvou parametrů (Salvucci a Goldberg, 2000). Malá prahová hodnota pro rozptyl a velká pro délku může vést k tomu, že nebudou identifikovány žádné fixace.

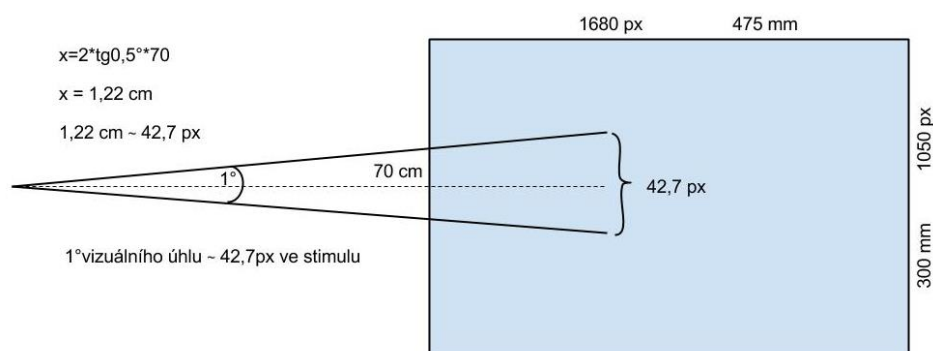
Z tohoto důvodu je u I-DT algoritmu velice důležité správné nastavení parametrů. Při vhodně zvolených prahových hodnotách však I-DT poskytuje velice dobré výsledky (Salvucci a Goldberg, 2000).

Algoritmus I-DT je zaměřen na detekci fixací na základě prostorové a časové blízkosti naměřených pozic oka. V algoritmu je definováno časové okno, které se pohybuje naměřenými daty. Prostorová blízkost bodů obsažených v časovém okně je porovnávána s definovanou prahovou hodnotou. V případě, že je rozptyl nižší než prahová hodnota, body obsažené v časovém okně jsou označeny jako část fixace. V opačném případě se okno o jeden záznam posune a první bod předchozího okna je klasifikován jako část sakády (Komogortsev a kol., 2010).

Hledáním optimální prahové hodnoty rozptylu se zabýval Blignaut (2009). Ve své detailní studii došel k závěru, že optimální prahová hodnota pro rozptyl by měla být 1°. Podobnou hodnotu uvádí i Salvucci a Goldberg (2000), kteří doporučují nastavení prahové hodnoty mezi 0,5° a 1° vizuálního úhlu. Holmqvist (2011) doporučuje stanovení prahové hodnoty v intervalu mezi 0,5° a 2°.

Ve většině studií zaměřených na hodnocení kartografických děl údaj o nastavení identifikačních algoritmů chybí. Hermans a Laarni (2003), kteří se zabývali analýzou hledání konkrétního objektu v interaktivní mapě, použili prahovou hodnotu rozptylu 2°. Coltekin (2009) zkoumala efektivitu interaktivních map a prahovou hodnotu rozptylu nastavila na 50 px. Sama autorka však uvádí, že se toto nastavení neopírá o žádná předem stanovená pravidla. Stejné nastavení využila i ve své další studii (Coltekin a kol., 2010) a uvádí příklady dalších autorů, kteří použili stejné nastavení (např. (Goldberg a Kotval, 1999)).

Aplikace Tobii Studio, kterou Coltekin pro naměření dat a identifikaci fixací využívala, vyžaduje zadání prahové hodnoty v pixelech (oproti jiným aplikacím, kde se zadává hodnota ve stupních vizuálního úhlu). Hodnotu v pixelech je nutné zadat také do aplikace BeGaze, která je využívána v autorově výzkumu. V případě, že je oko respondenta vzdálené od roviny obrazovky 70 cm, pak hodnota 1° vizuálního úhlu odpovídá 42,7 px. Výpočet podle goniometrických funkcí ostrého úhlu je znázorněn na obrázku 8.



Obr. 8 Převod mezi prahovou hodnotou udávanou ve stupních a pixelech

Irwin (1992) se zabýval stanovením optimální prahové hodnoty délky fixace a zjistil, že 100 ms je vhodný a praktický kompromis mezi teoretickým minimem a maximem. Ke stejnému zjištění došel také Manor a Gordon (2003). Podle Holmqvista (2011) by se měla prahová hodnota délky fixace pohybovat v rozmezí 50–250 ms. Hodnota 100 ms je často využívána v kartografických studiích (Coltekin a kol., 2010; Coltekin a kol., 2009; Fabrikant

a kol., 2010). Oproti tomu Hermans a Laarni (2003) nastavili prahovou hodnotu délky fixace pouze na 80 ms.

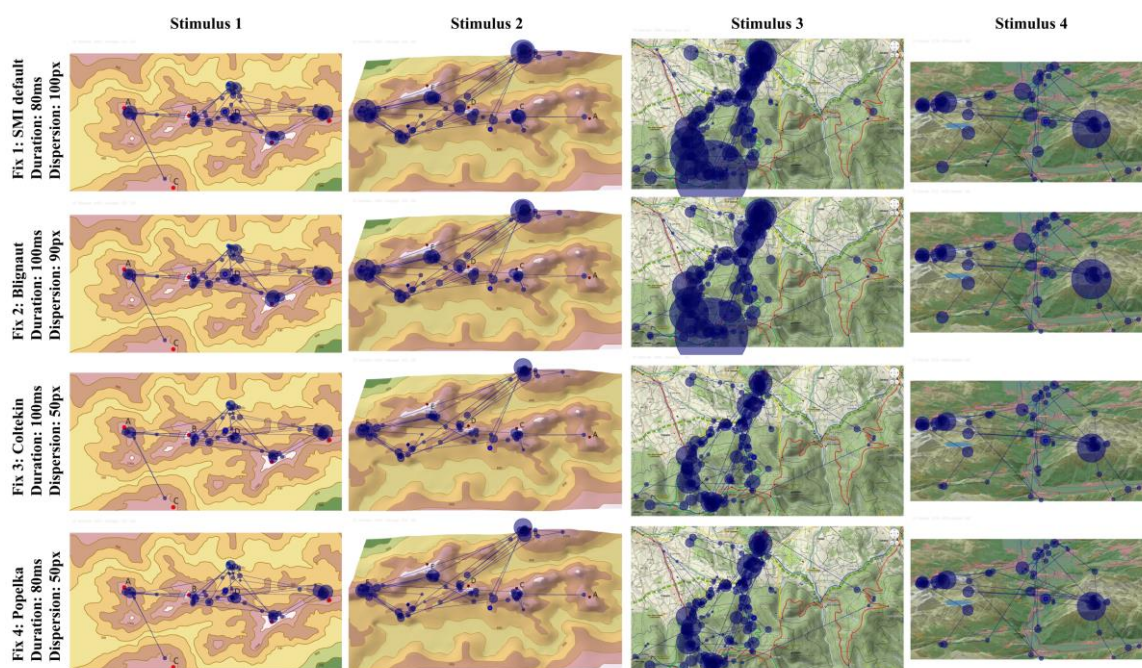
Stanovení prahových hodnot algoritmu I-DT se může lišit podle oblasti studia a konkrétní studie. Doporučuje se také, aby byly vytvořené fixace porovnány s původními naměřenými daty (Holmqvist a kol., 2011).

4.1.2. Srovnání nastavení algoritmu I-DT

Před vlastním vyhodnocením dat naměřených v případových studiích byly srovnány čtyři nastavení I-DT algoritmu. **Fix 1** je základní nastavení používané programem SMI BeGaze. Nastavení **Fix 2** použité ve studii Blignauta (2009) je velice podobné prvnímu zmiňovanému. Obě vytváří menší počet delších fixací. Takové nastavení je vhodné například pro úkoly, kdy uživatel nad stimulem neřeší žádný specifický úkol (free-viewing). Pro účely kartografie je však vhodnější identifikovat větší počet fixací s menší průměrnou délkou. Proto je nutné zvolit menší prahovou hodnotu rozptylu. Nastavení používané například ve studii Coltekin (2009), ale i dalšími autory je označené jako **Fix 3**. Nastavení **Fix 4** je definováno autorem na základě porovnání identifikovaných fixací s původními naměřenými daty. Prahové hodnoty jednotlivých nastavení jsou uvedeny v tabulce 6.

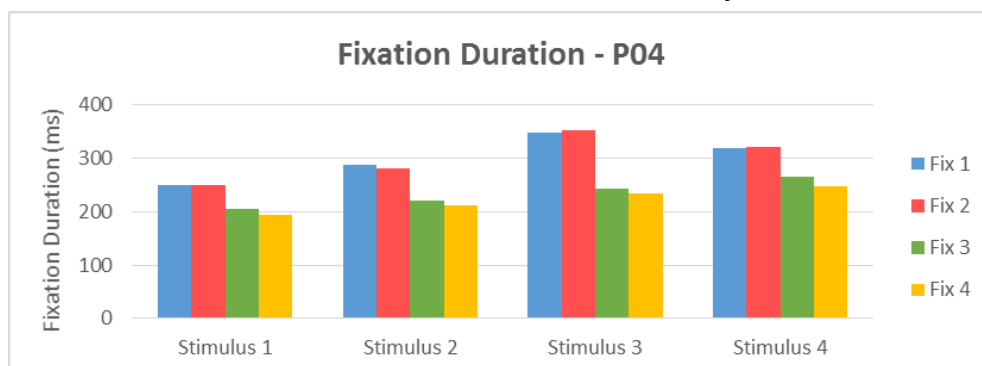
Tab. 6 Srovnávaná nastavení identifikačního algoritmu

	Fix 1	Fix2	Fix 3	Fix 4
Autor nastavení	SMI Default	Blignaut (2009)	Coltekin (2009)	Popelka
Délka (ms)	80	100	100	80
Rozptyl (px)	100	90	50	50



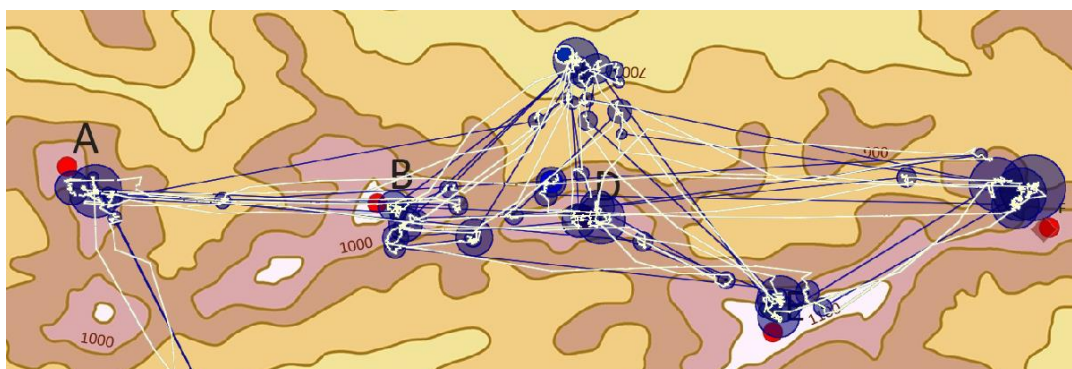
Obr. 9 Porovnání čtyř nastavení identifikace fixací pomocí I-DT algoritmu

Rozdíly mezi Fix 1-Fix 2 a Fix 3-Fix 4 jsou jasně patrné z ukázky na obrázku 9. Kružnice v prvních dvou řádcích (Fix 1, Fix 2) jsou jasně větší než v řádcích následujících (Fix 3, Fix 4), protože délka fixací je větší. Graf na obrázku 10 ukazuje, že rozdíl v délce fixací mezi Fix 1-Fix 2 a Fix 3-Fix 4 dosahoval hodnot průměrně 75 ms. Největší rozdíl byl zaznamenán v případě stimulu 03. Rozdíl mezi nastavením Fix 2 a Fix 4 zde byl téměř 120 ms.



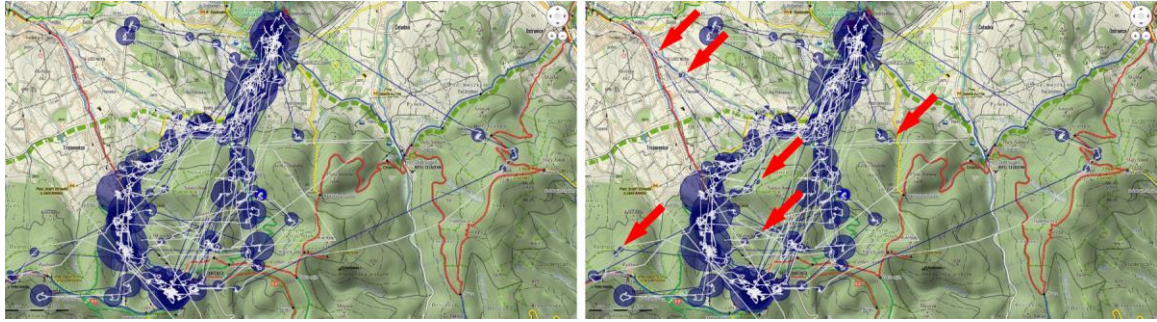
Obr. 10 Porovnání průměrné délky fixací pro jednoho respondenta a čtyři stimuly

Autorem vytvořené nastavení Fix 4 je modifikací nastavení využívaného v kartografických studiích (např. (Coltekin a kol., 2009)). Pro ověření korektní identifikace fixací doporučuje Holmqvist (2011) vizuální porovnání fixací s prvotními (raw) daty. Při volbě prahových hodnot 80 ms a 50 px dojde k nejpřesnější shodě mezi vytvořenými fixacemi a naměřenými daty (obr. 11).



Obr. 11 Porovnání naměřených fixací (modré kružnice) a původních naměřených dat (bílá linie)

Protože nastavení Fix 3 a Fix 4 jsou si velmi podobná, identifikované fixace jsou téměř stejné. Při detailním pohledu je ale možné nalézt několik důležitých rozdílů. Výřez Scanpath na obrázku 12 zobrazuje data jednoho uživatele (P04) na podkladu stimulu obsahujícího turistickou mapu. Úkolem respondentů v tomto experimentu bylo nalezení optimální trasy mezi dvěma body. Rozdílně identifikované fixace jsou na obrázku 12 označeny pomocí šipek. Při použití nastavení Fix 4 bylo identifikováno více fixací než při Fix 3. Při srovnání s původními naměřenými daty (bílá linie) je patrné, že se v těchto místech oko opravdu zastavilo (fixovalo).



Obr. 12 Porovnání rozdílů výsledku identifikačního algoritmu. Při použití nastavení Fix 4 (vpravo) bylo nalezeno více fixací než v případě nastavení Fix 3 (vlevo). Rozdíly jsou označeny pomocí šipek. Bílá linie reprezentuje původní naměřená data.

4.1.3. Identifikace fixací a sakád v aplikaci OGAMA

Pro analýzu dat bylo kromě aplikace BeGaze využito také open-source programu OGAMA. Přestože OGAMA umožňuje import fixací, při práci s programem bylo zjištěno, že tato funkce nefunguje. Z toho důvodu byly nastaveny parametry pro identifikaci fixací přímo v aplikaci OGAMA. Přestože OGAMA rovněž využívá algoritmus I-DT, nastavení parametrů je od BeGaze poměrně odlišné - je nutné nastavit následující parametry:

- **Maximum distance** – maximální vzdálenost v pixelech, kterou od sebe mohou být body vzdálené, aby byly stále považovány jako součást fixace,
- **Minimum number of samples** – minimální počet bodů, které tvoří fixaci,
- **Merge** – sloučení po sobě jdoucích fixací, které jsou blíže, než je maximální vzdálenost,
- **Diameter ratio of fixation** – poloměr vykreslené kružnice bude zvětšen o rozdíl mezi délkou konkrétní fixace a touto hodnotou

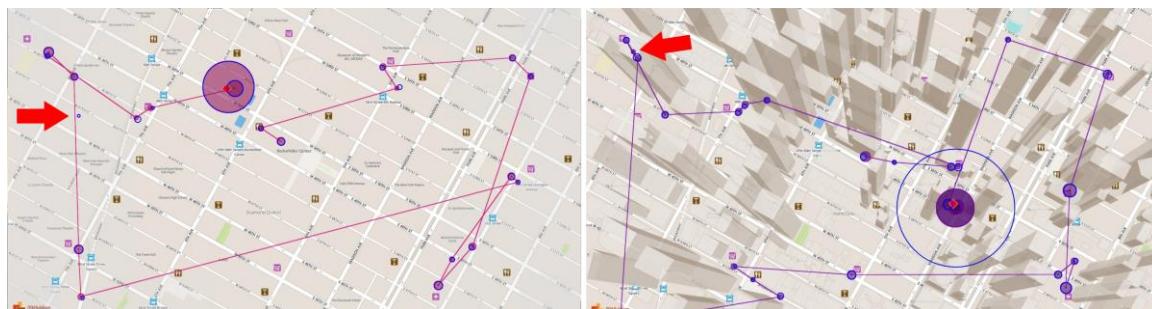
Při hledání optimálního nastavení parametrů pro detekci fixací v OGAMA využil autor snímek Scanpath z BeGaze, přes který byly vykreslené fixace detekované programem OGAMA. Parametry byly modifikovány, dokud nebylo nalezeno takové nastavení, které nejlépe odpovídá fixacím identifikovaným pomocí BeGaze.

Tab. 7 Nastavení parametrů pro detekci fixací v programu OGAMA

Parametr	OGAMA Default	Zvolené nastavení
Maximum distance	20	15
Minimum number of samples	10	10
Merge	YES	NO
Diameter ratio of fixation	2	12

Nejdůležitější parametry jsou „Maximum distance“ a „Minimum number of samples“, které odpovídají parametrům zadávaným do BeGaze - rozptylu a délce fixace. Autor experimentálně zjistil, že optimální nastavení je 15 px a 10 bodů. S použitím tohoto nastavení je výsledná trajektorie oka (Scanpath) téměř shodná s trajektorií vytvořenou v aplikaci BeGaze. Hodnota parametru „Diameter ratio of fixation“ ovlivní pouze grafické zobrazení fixací prostřednictvím Scanpath. Se zobrazením Scanpath z aplikace BeGaze

nejlépe korespondovala hodnota parametru 12, pouze u velmi dlouhých fixací docházelo k rozdílům, jak je patrné z obrázku 13. Zde je porovnán Scanpath vzniklý v aplikaci BeGaze (fialové kruhy) s fixacemi identifikovanými v aplikaci OGAMA (modré kružnice) pomocí výše uvedeného nastavení algoritmu. K jediné odchylce došlo v levé části obrázku vlevo, kdy aplikace OGAMA identifikovala jednu krátkou fixaci navíc oproti BeGaze. Rozdíl v grafické vizualizaci velmi dlouhých fixací je znázorněn na obrázku vpravo. Obě nesrovnalosti je možné vyřešit změnou parametrů identifikačního algoritmu, ale tato změna by ovlivnila všechny ostatní fixace. Z toho důvodu bylo shledáno nastavení uvedené v tabulce 7 jako nejvhodnější pro všechny experimenty.



Obr. 13 Srovnání fixací identifikovaných programy BeGaze (fialové kruhy) a OGAMA (modré kružnice). Rozdílně identifikované fixace jsou označené červenou šipkou.

Naměřená data byla do OGAMA převedena pomocí jednoduchého Java programu vytvořeného Kristien Ooms z univerzity v Gentu (Belgie) na základě postupu navrženého autorem disertační práce. Program převádí naměřená data do struktury vhodné pro import do OGAMA.

4.2. Metody analýzy eye-tracking dat

Na základě studia odborné kartografické literatury a autorových zkušeností bylo vybráno, detailně popsáno a ohodnoceno 15 metod rozdělených do sedmi kategorií:

- Vizualizace trajektorií – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube
- Porovnání průběhu trajektorií – Scanpath comparison
- Attention maps
- Analýzy oblastí zájmu – AOI Transitions, Gridded AOI, Sequence Chart, Binning Chart
- GIS analýzy v programu V-Analytics – FlowMap, TimeLine
- Manuální analýza eye-tracking dat
- Statistická analýza – Eye-tracking metriky

4.2.1. Vizualizace trajektorií – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube

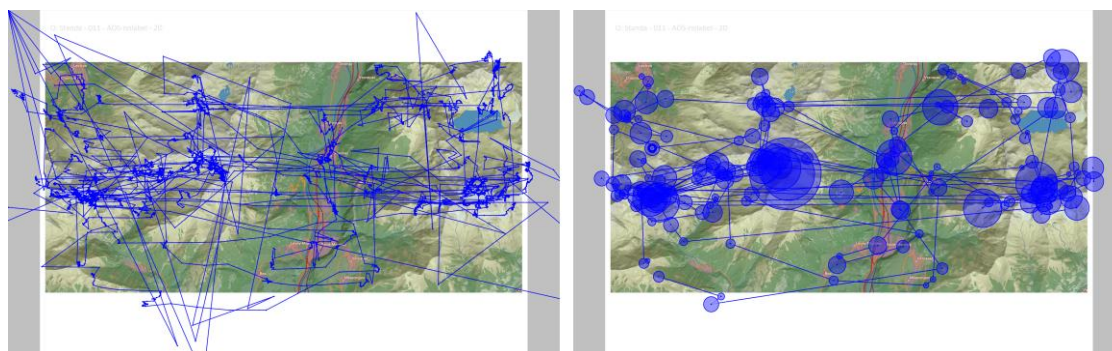
Mezi nejjednodušší metody vizuální analýzy patří prosté vykreslení trajektorie oka nad studovaným stimulem. K tomu se nejčastěji používají dvě metody. První z nich je GazeReplay, kdy je trajektorie oka zobrazena formou animace a je zobrazena pouze několikavteřinová část trajektorie. Druhou metodou je Scanpath, někdy též označovaný jako GazePlot. V tomto případě je výstupem statický obrázek zobrazující trajektorii oka za celou dobu trvání trialu (pozorování jednoho stimulu uživatelem).

GazeReplay je metoda vizualizace eye-tracking dat, kdy jsou informace o fixacích a sakádách zobrazovány dynamicky nad sledovaným obrazem měnícím se v čase. GazeReplay lze využít při kvalitativním vyhodnocení uživatelské percepce studovaného

stimulu. GazeReplay je nejpřesnější metodou pro analýzu eye-tracking dat, protože nedochází k žádné interpolaci ani generalizaci (Nielsen a Pernice, 2010). GazeReplay ukazuje přesně pozici, kam se uživatel díval. Analýza těchto výsledků je ale velice složitá. Pomocí GazeReplay je možné přehrát videozáznam práce uživatele s dokumentem, přičemž součástí obrazu je bod, na který se uživatel v průběhu videozáznamu soustředil. Vhodné je tento přístup zkombinovat s metodou think-aloud, což umožní analyzovat pohyby uživatelských očí v souvislosti s konkrétní činností.

Velmi cennou metodou pro zobrazování dat z eye-trackingu je tzv. **Scanpath**. Podle Holmqvista (2011) byl tento termín poprvé použit v 70. letech 20. století. Scanpath bývá také označován jako GazePlot, Fixation Track, nebo Eye-Movement Pattern. Jedná se o trajektorie sakád spojující pozice fixací, zobrazené přes studovaný obraz, který slouží jako podklad. Scanpath zobrazuje fixace jako kruhy o různé velikosti (jejich poloměr odpovídá délce fixací) a sakády jako linie, které tyto kruhy spojují (Raiha a kol., 2005). Omezení této metody nastává v případě zobrazování většího množství dat, kdy díky překryvům jednotlivých fixací není možné vizuálně poznat jejich počet. Scanpath lze, podobně jako výše zmíněný GazeReplay, využít zejména při kvalitativním hodnocení eye-tracking experimentu. Vizuálním hodnocením Scanpath se zabýval například Buswell (1935), který hodnotil uživatelské vnímání obrazů na základě pořadí a pozice jednotlivých fixací a vyhodnocením míst, na která se uživatel díval (fixoval) a na která ne. Scanpath je možné využít také při ověření kvality naměřených dat, získání představy o rozmístění fixací nebo jako ilustrační obrázek popisující chování uživatele v rámci stimulu.

V obou případech je možné zobrazit jak původní naměřená data, tak i z nich odvozené fixace a sakády. Postup tohoto odvození je popsán v předchozí kapitole. Zobrazení fixací a sakád na místo původních naměřených (raw) dat je výhodný ze dvou důvodů. Prvním z nich je větší přehlednost celé vizualizace, druhým pak filtrace chyb měření. K těm může docházet v případě, že zařízení ztratí na několik málo milisekund signál. V tomto případě se pak místo skutečné souřadnice pohledu oka zapíše hodnota (0,0). Při zobrazení surových dat se pak části trajektorie oka zobrazují v levém horním rohu stimulu, jak je to patrné z obrázku 14.

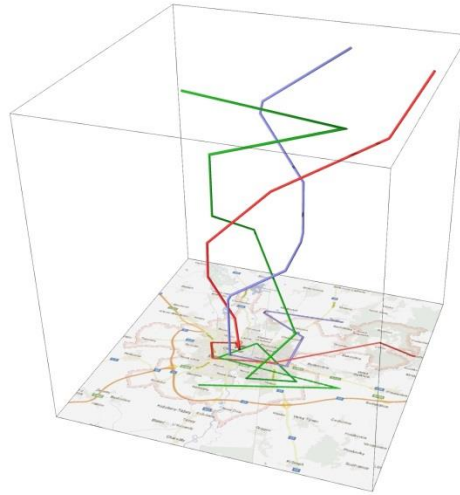


Obr. 14 Zobrazení naměřených (Raw) dat (vlevo) a vizualizace fixací a sakád formou Scanpath (vpravo)

Při použití dvoudimenzionální vizualizační metody (Scanpath) dochází ke ztrátě informace o čase a pořadí jednotlivých fixací. Pokud jsou data objemnější (obsahují informace za delší časové období), může při vizualizaci docházet k jejich překryvům a nemožnosti interpretace. Existuje několik metod, pomocí kterých je možné zobrazit i časovou složku dat a umožnit tak hlubší analýzu daného jevu. Nejjednodušší je zřejmě využití animace (GazeReplay) nebo rozdělení trajektorie na několik úseků podle času. Takto

ovšem není možné najednou zobrazit všechna data. Metoda, která nezanedbává ani jednu složku výsledných dat, využívá tzv. Space-Time-Cube.

Švédský geograf Hägerstrand (1970) se v sedmdesátých letech 20. století zabýval takzvanou geografii času (Time Geography). Nejvýznamnějším prvkem v Hägerstrandově časoprostorovém modelu je Space-Time-Cube (STC). Prostor je zobrazen uvnitř krychle, přičemž základna krychle (osa X a Y) slouží k zobrazení 2D geografického prostoru, a ve směru osy Z je zobrazen čas. Pokud v čase nedochází ke změně polohy sledovaného objektu nebo jevu, je linie kolmá k základně krychle. Čím pozvolněji je linie mezi dvěma lomovými body, tím rychleji došlo ke změně polohy sledovaného objektu/jevu (obr. 15).

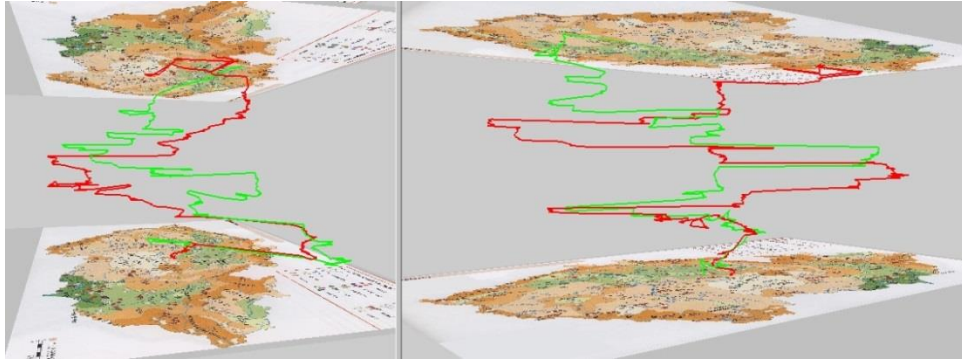


Obr. 15 Koncept Space-Time-Cube

Vizualizaci dat metodou Space-Time-Cube nabízí několik aplikací. Jedná se například o OpenDX, ILWIS, nebo extenzi k programu uDig, která byla vyvinuta týmem okolo Menno-Jana Kraaka na ITC v nizozemském Enschede. Přímo na vizualizaci metodou Space-Time-Cube je zaměřen komerční software GeoTime. Existuje také extenze k Esri ArcGIS, jejíž funkcionality je ovšem velmi omezená. Hodnocením softwarů umožňujících vizualizaci pomocí STC se zabývala Petrenko (2011), která jako nejvhodnější software označila CommonGIS (později přejmenovaný na V-Analytics) vyvíjený na Fraunhofer Institute IAIS v německém Sankt-Augustinu.

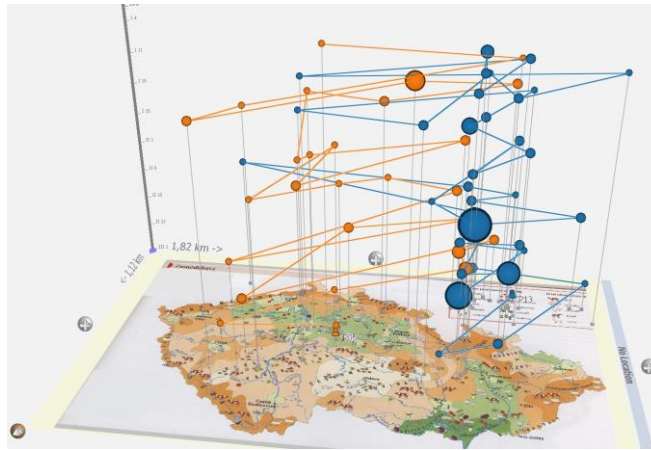
Prostřednictvím Space-Time-Cube je možné zobrazit jakákoliv časoprostorová data. Těmi mohou být například údaje zaznamenané prostřednictvím GPS přístroje, statistická data obsahující informaci o poloze a času nebo právě data zachycená prostřednictvím eye-trackingu. Pokud chceme vizualizovat data poskytovaná eye-trackerem, nabízí se dvě možnosti. První možností je zobrazení linie odpovídající trajektorii pohybu oka. Druhou pak vizualizace fixací propojených linií.

Vizualizace surových dat byla využita při analýze uživatelského chování při čtení mapy zemědělství ze Školního atlasu ČR (Herink a Kastner, 2004). Z obrázku 16 je patrné, že v prvních dvou vteřinách řešení úkolu oba respondenti volili takřka totožné trajektorie pohybu oka. Jedny z prvních fixací obou respondentů jsou lokalizovány v oblasti legendy. Poté už respondenti hledali odpověď na zadanou otázku a začali prohledávat mapu.



Obr. 16 Srovnání trajektorie pohledu dvou respondentů

Vizualizace na obrázku 16 vznikla v aplikaci V-Analytics. Pro vizualizaci fixací propojených sakádami je vhodnější využít komerční aplikaci GeoTime. V-Analytics sice umožňuje import a zobrazení fixací, není ale možné znázornit jejich velikost. Z vizualizace na obrázku 17 je patrné, že respondent označený modrou barvou strávil mnohem více času v legendě než respondent označený barvou oranžovou.



Obr. 17 Srovnání fixací dvou respondentů

S využitím Space-Time-Cube je možné analyzovat vztah mezi prostorem a časem. Obě složky jsou totiž zobrazené zároveň. Tato forma vizualizace ale není příliš rozšířená, takže se někomu může jevit jako složitá a nepřehledná. Ke správné interpretaci výsledků je nutné interaktivní zobrazení STC. Získání představy o průběhu jednotlivých trajektorií pohybu očí v čase je při použití statických obrázků velice složité. Z těchto důvodů je využití Space-Time-Cube pro analýzu eye-tracking dat velmi omezené.

4.2.2. Scanpath comparison

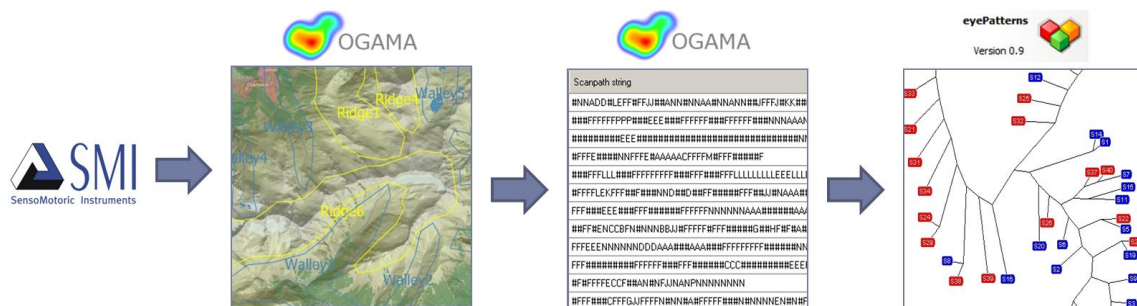
Kromě vizuální analýzy průběhu trajektorie pohybu očí (Scanpath) je možné porovnat průběh trajektorií více uživatelů a odhalit tak, kteří respondenti se na stimulus dívali podobně, jestli lze nalézt skupiny respondentů s podobnou strategií nebo naopak vyčlenit ty respondenty, kteří zvolili jiný postup než většina.

Touto problematikou se zabývá skupina metod označovaných jako Scanpath comparison. Jedná se o vzájemné porovnání trajektorií pohledu jednotlivých uživatelů a nacházení jejich vzájemných souvislostí. Takto je možné hledat specifické vzory pro určité skupiny respondentů (např. odborník/laik). Existuje množství metod pro porovnání

jednotlivých trajektorií. Jedná se například o linear distance (Mannan a kol., 1995), String-edit distance (Privitera a Stark, 2000) nebo Cross-Recurrence Analysis (Dale a kol., 2011).

Nejčastěji využívanou metodou porovnání trajektorie oka (Scanpath comparison) je tzv. **String-edit distance**. Tento postup vyvinuli Privitera a Stark (2000). Prostorová informace (průběh trajektorie oka) je kvantifikována tak, že nahradíme fixace označením oblasti zájmu (AOI), ve které byly zaznamenány. Scanpath je tedy nahrazen řetězcem písmen a podobnost trajektorií je nahrazena počtem operací (vlození, smazání, nahrazení) nezbytných k přeměně jednoho řetězce na jiný. Nevýhodou tohoto přístupu je tedy jakási generalizace, kdy přesné koordináty X a Y nahrazujeme pouze označením oblasti zájmu, ve které se fixace nacházela.

Při využívání této metody je tedy nutné ve stimulu nadefinovat oblasti zájmu (viz podkapitola 4.2.4). Metoda String-edit distance je vhodná především pro ty stimuly, kde je vhodné definovat oblasti zájmu. Jedná se například o kompoziční prvky mapy, jednotlivé diagramy nebo jednoduše definovatelné prvky mapy (údolí vs. hřebeny). Barevně jsou rozlišeny dvě skupiny respondentů. Červenou barvou jsou znázorněni kartografové, modrou pak respondenti bez kartografického vzdělání.



Obr. 18 Schéma použití metody String-edit distance

Postup využití metody String-edit distance je znázorněn na obrázku 18. Naměřená data jsou vyexportována a následně převedena do programu OGAMA. Zde jsou nadefinovány oblasti zájmu. V tomto konkrétním případě se jednalo o údolí a hřebeny na mapě ze švýcarského interaktivního atlasu. V softwaru OGAMA jsou následně pro jednotlivé uživatele vygenerovány řetězce kódů navštívených oblastí zájmu. Posledním krokem je převod těchto řetězců do freeware aplikace eyePatterns, kde je vytvořen stromový graf reprezentující podobnost jednotlivých uživatelů na základě pořadí navštívených AOI.

Tato podobnost je vypočítána na základě jednoho ze tří možných algoritmů. Jedná se o Default scoring scheme, Basic scoring scheme a Scoring matrix. Ve své diplomové práci se popisem programu eyePatterns zabýval Hanzelka (2013).

Default scoring scheme ukazuje, jak jsou od sebe sekvence odlišné. Hodnota 0 tedy znamená, že jsou sekvence identické. Čím je hodnota větší, tím rozdílnější sekvence jsou. Základem této metody je Levenshteinova vzdálenost, která je založena na celkovém počtu operací, představujících změny řetězců tak, aby se shodovaly. Mezi operace lze v tomto případě zařadit vložení, smazání nebo nahrazení znaku.

Basic scoring scheme využívá algoritmus Needleman-Wunsch, který vyhodnocuje jednotlivé části sekvencí a jejich podobnosti. Vstupem jsou sekvence stejné délky, kterých lze docílit srovnáním pomocí mezer, a zadané ohodnocení, které porovnává, zda jsou jednotlivé části sekvence stejné, rozdílné nebo se na daném místě nachází mezera. Základem může být hodnocení +1 za shodu, -1 za neshodu a 0 za mezeru. Z toho tedy plyne,

že čím vyšší hodnota výsledku, tím je větší podobnost sekvencí. Příklad naznačuje srovnávání stejných, odlišných a chybějících písmen:

```

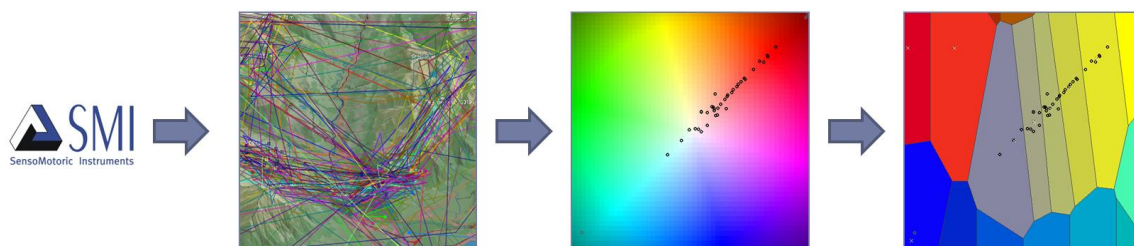
BLLBBLBNLLBBLBNLLFBLFB---LFFLLLLLFFFNB
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
BLLBNBNLFBLBNLFFBLFBNNNLFFLLLLLFFFNB

```

Poslední nastavení, označované jako Scoring matrix, vychází z Basic scoring scheme. Jeho výhoda spočívá v tom, že je možné nadefinovat si hodnotu shody, neshody i mezery pro jednotlivé dvojice AOI. Je tedy možné nastavit, že přechod z AOI ležících blízko sebe bude ohodnocen menší hodnotou než přechod mezi vzdálenějšími AOI. Další využití Scoring matrix se nabízí v případě, že např. legenda v mapě je rozdělena do více částí a je tedy znázorněna pomocí několika AOI. Pomocí Scoring matrix lze nastavit nulový postih za přesun z jedné části legendy do druhé.

Další používanou metodou porovnání Scanpath je tzv. **PSA - Path Similarity Analyses**. PSA byla představena ve studii Andrienka (2012) a je možné ji použít díky funkcionalitě programu V-Analytics. Na rozdíl od předchozí metody, PSA porovnává přímo spojnicí fixací (trajektorii pohybu oka). Pomocí funkce „route similarity“ je vytvořena matice a spočítána vzdálenost mezi jednotlivými trajektoriemi. Tato matice je využita pro vytvoření 2D projekce sady trajektorií prostřednictvím multi-dimenzionálního škálování nebo Sammonsova mapování. Na základě této projekce mohou být trajektorie porovnány mezi sebou a mohou být definovány clusterly na základě jejich podobnosti.

Postup použití metody Path Similarity Analysis je znázorněn na obrázku 19. Identifikované fixace jsou převedeny do prostředí aplikace V-Analytics. Zde je nutné nejdříve vytvořit matici vzdáleností mezi jednotlivými trajektoriemi (Compute matrix of distances). Poté jsou data zobrazena pomocí Sammonovy projekce (Apply Sammon's projection to a pre-computed matrix of distances). Nakonec lze vytvořit libovolný počet skupin (clusterů). Výhoda metody PSA spočívá především v tom, že pro její použití není nutné vytvářet oblasti zájmu (AOI). Je jí tedy možné použít u takových stimulů, kde nejsou logické celky, kolem kterých by mohly být jednoduše vytvořeny oblasti zájmu.

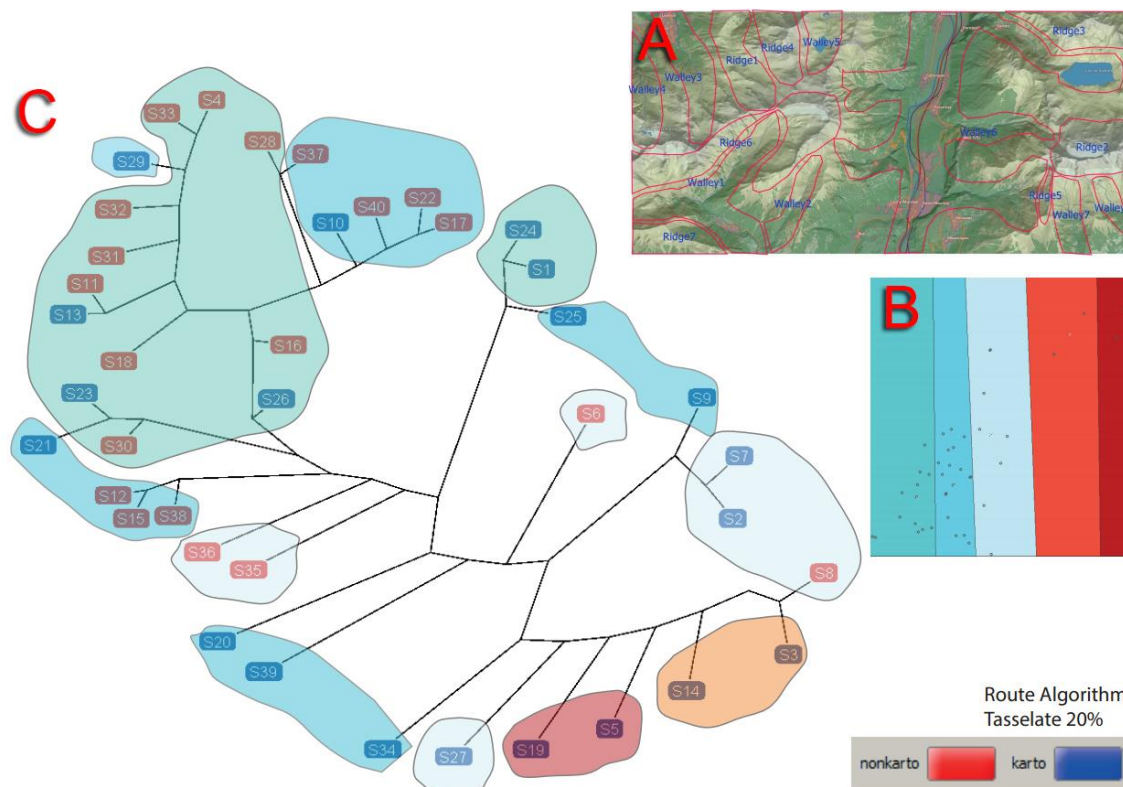


Obr. 19 Schéma použití metody Path Similarity Analysis

Výše zmíněné metody byly využity například ve studiích (Fabrikant a kol., 2008; Garlandini a Fabrikant, 2009). Cílem autorovy studie (Popelka a kol., 2013) bylo porovnání obou metod a ověření, že výsledné shluky jsou podobné.

Základem pro porovnání obou metod byl výsledek analýzy PSA v programu V-Analytics znázorněný pomocí Sammonovy projekce. Testovaným stimulem byla mapa ze švýcarského interaktivního atlasu (obrázek 20 - A). Důležitým prvkem bylo rozložení uživatelů a příslušnost ke konkrétní skupině – tedy barvě. Na obrázku 20 - B lze vidět příklad výsledku v Sammonově projekci, který byl dále srovnáván.

V eyePatterns, který zobrazuje shluk na základě sekvencí navštívených AOI, byla upravena barevnost jednotlivých prvků tak, aby odpovídala barvám shluků vzniklých v Sammonově projekci. Výsledek těchto úprav a srovnání lze vidět na obrázku 20 - C. Tímto porovnáním se potvrdilo, že oba přístupy jsou použitelné a výsledky mohou být srovnatelné.



Obr. 20 Porovnání výsledků Scanpath comparison pomocí String-edit algoritmu a PSA

Možnou alternativou k těmto dvěma výše zmíněným řešením se zabývala Jarodzka (2010), která vyvinula multidimenzionální přístup pracující nejen s trajektorií pohybu oka, ale také s délkami a počtem fixací. Nevýhodou této metody je ovšem fakt, že dokáže srovnat pouze dva uživatele. Výše zmíněné metody jsou schopny rozdělit uživatele do skupin podle průběhu trajektorie jejich pohledu.

4.2.3. Attention maps

Attention mapy (označované též jako Heat mapy) jsou nástrojem k vizualizaci kvantitativních charakteristik pohledu uživatele. Je z nich patrné, které oblasti sledovaného obrazu uživatel zkoumá pohledem více a kterým naopak nevěnuje pozornost. Attention mapy jsou v eye-trackingu velice výhodné pro vytvoření rychlého přehledu, na které části dokumentu se uživatelé soustředí a které je vhodné hlouběji analyzovat. Existují v mnoha formách a jsou široce využívány v různých odvětvích lidské činnosti ke grafické reprezentaci rozsáhlých datových sad do dvourozměrného obrazce.

Attention mapy se vytvářejí dvěma zdánlivě rozdílnými, ale přesto velice podobnými principy (Holmqvist a kol., 2011). Jedná se o tzv. Gridded AOI a topologický (Gausovský) povrch. Oba druhy attention map je možné vytvářet z prvotních (raw) i klasifikovaných dat (fixací).

První zmíněná metoda rozdělí prostor (stimulus) na pravouhlou síť oblastí zájmu (AOI). Zapsáním hodnoty určité eye-tracking metriky (Dwell Time, Fixation Count) a obarvením výsledku dle této hodnoty vzniká attention mapa. Kromě výše zmíněných a velice často využívaných metrik můžeme vizualizovat například metriku Entry time – čas, kdy byla v oblasti poprvé zaznamenána fixace. Takto je možné získat přehled o tom, které části stimulu uživatelé navštívili na začátku trialu a které později. Navzdory této univerzálnosti nejsou attention mapy vytvořené tímto principem těmi nejčastěji využívanými.

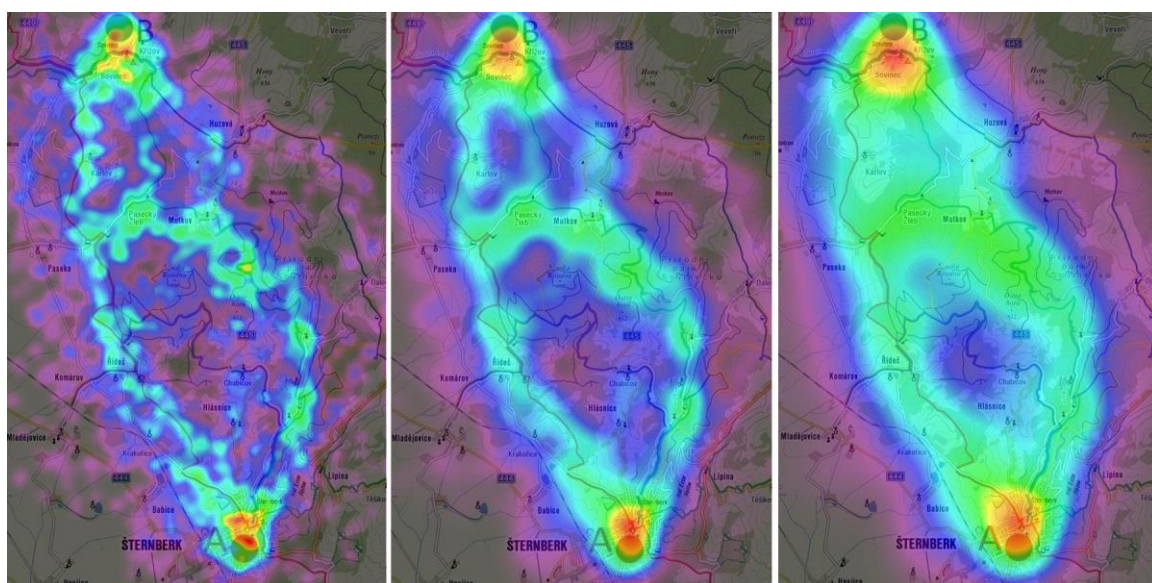
V případě Gridded AOI attention map jsou hranice mezi buňkami ostré. Oproti tomu u Gaussových attention map jsou přechody plynulé. Gaussovy attention mapy jsou vytvářeny postupným přidáváním hodnoty délky fixací k jednotlivým pixelům stimulu. Protože je takto ohodnoceno pouze relativně malé množství pixelů, jsou tato data proložena Gaussovou funkcí. Tato funkce je definována jako:

$$G(i, j) = \exp\left(\frac{-[(i - u)^2 + (j - v)^2]}{2\sigma^2}\right) \quad [1]$$

kde x_i, y_i jsou souřadnice středu fixace a hodnoty x a y odpovídají rozlišení stimulu.

Výsledná attention mapa vzniká aplikací Gaussovy funkce pro každý střed fixace a následným nahrazením všech těchto dílčích funkcí jedinou Gaussovou funkcí (upraveno podle (Holmqvist a kol., 2011)).

Při vytváření Attention map je velice důležité dbát na nastavení hodnoty σ (sigma), označované též jako kernel width, která odpovídá velikosti shlazení výsledné funkce. Při nastavení nízkých hodnot bude výsledná mapa pokrývat pouze oblast v bezprostředním okolí středů zaznamenaných fixací. Oproti tomu vysoká hodnota sigma způsobí větší rozšíření Attention mapy. Výsledná vizualizace bude výraznější, ale také méně přesná. Vysoké hodnoty sledovaného jevu (např. počtu fixací) budou i v oblasti, kde žádné fixace zaznamenány nebyly. Vliv rozdílného nastavení hodnoty kernel width v programu OGAMA je znázorněn na obrázku 21. Při využívání vizualizace formou Attention map v případových studiích je nezbytné vždy uvést velikost hodnoty sigma. Vhodné je ve všech výstupech používat stejnou hodnotu tak, aby bylo možné jednotlivé výstupy vzájemně porovnat.



Obr. 21 Vliv nastavení hodnoty kernel width v programu OGAMA. Vlevo je nastavená hodnota 50, uprostřed 100 a vpravo 200

Attention mapy jsou vhodné pro zjištění rychlého přehledu o prostorovém rozložení fixací ve stimulu. Pro detailní analýzu ale příliš vhodné nejsou. Data jsou agregována za více respondentů a výsledek může být ovlivněn i jedním uživatelem, který se choval odlišně od zbytku skupiny. Z výsledné attention mapy nelze tuto skutečnost žádným způsobem rozpoznat.

4.2.4. Analýza oblastí zájmu

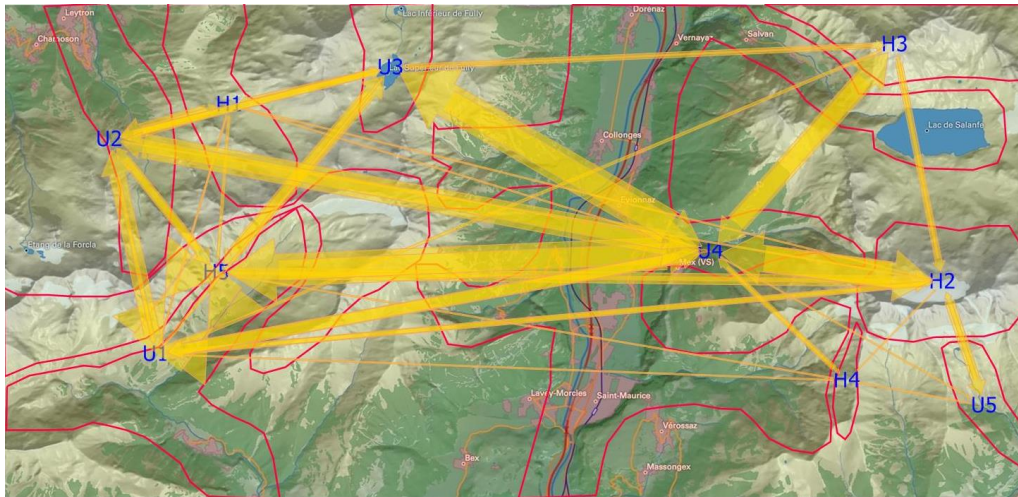
Další z možností analýzy naměřené pohyby očí využívá oblastí zájmu (Areas of Interest - AOI). Oblasti zájmu jsou regiony vyznačené na stimulu, pro které je zjišťováno, jak respondentů zaujaly, kolik fixací bylo v konkrétních oblastech zájmu zaznamenáno, jaké bylo pořadí navštívených oblastí atd. Pro každou vyznačenou oblast zájmu jsou vypočítány eye-tracking metriky (detailně popsáno v podkapitole 4.2.7). V aplikaci OGAMA je možné vytvářet skupiny AOI. Toho lze využít, pokud jsou cílem studia jak konkrétní oblasti zájmu, tak i jejich skupiny. Příkladem může být například legenda mapy rozdělená na více částí. Při analýze je možné studovat eye-tracking metriky pro jednotlivé části, tak legendu jako celek.

Kromě statistického srovnání jednotlivých částí stimulu jsou oblasti zájmu využívány při porovnání Scanpath metodou porovnání trajektorie oka (podkapitola 4.2.2).

Oblasti zájmu jsou často využívány pro tvorbu tzv. **Transition Matrix**. Tedy matice reprezentující přechod pohledu respondenta mezi jednotlivými oblastmi. V této matici jsou ve sloupcích i řádcích vypsány oblasti zájmu a hodnota v buňkách matice udává, kolikrát se pohled respondenta přesunul z jedné AOI do druhé. Tato data lze statisticky vyhodnotit, ale také vizualizovat. Program OGAMA umožňuje znázornit tyto přesuny pohledu pomocí šipek, a to jak v absolutních číslech, tak i relativně. Přesuny pohledů mezi oblastmi zájmu reprezentujícími hřebeny a údolí jsou znázorněny v tabulce 8 a vizualizovány v prostředí programu OGAMA (obr. 22).

Tab. 8 Transition matrix pro přesuny pohledů mezi oblastmi zájmu reprezentující hřebeny (H1 – H5) a údolí (U1 – U5)

AOI	H1	H2	H3	H4	H5	U1	U2	U3	U4	U5
H1	3	1	0	0	0	1	10	1	0	0
H2	0	77	2	0	3	4	0	0	20	7
H3	0	5	18	0	0	2	0	1	12	0
H4	0	1	0	0	1	1	0	0	4	0
H5	2	8	0	0	148	45	5	10	15	0
U1	1	3	0	0	43	112	12	0	9	0
U2	5	1	0	0	7	3	60	5	18	0
U3	4	0	4	0	7	2	5	41	17	0
U4	1	19	16	2	24	8	10	26	447	0
U5	0	3	0	1	0	0	0	0	1	0



Obr. 22 Vizualizace přesunů pohledu mezi oblastmi zájmu reprezentujícími hřebeny (H1 - H5) a údolí (U1-U5)

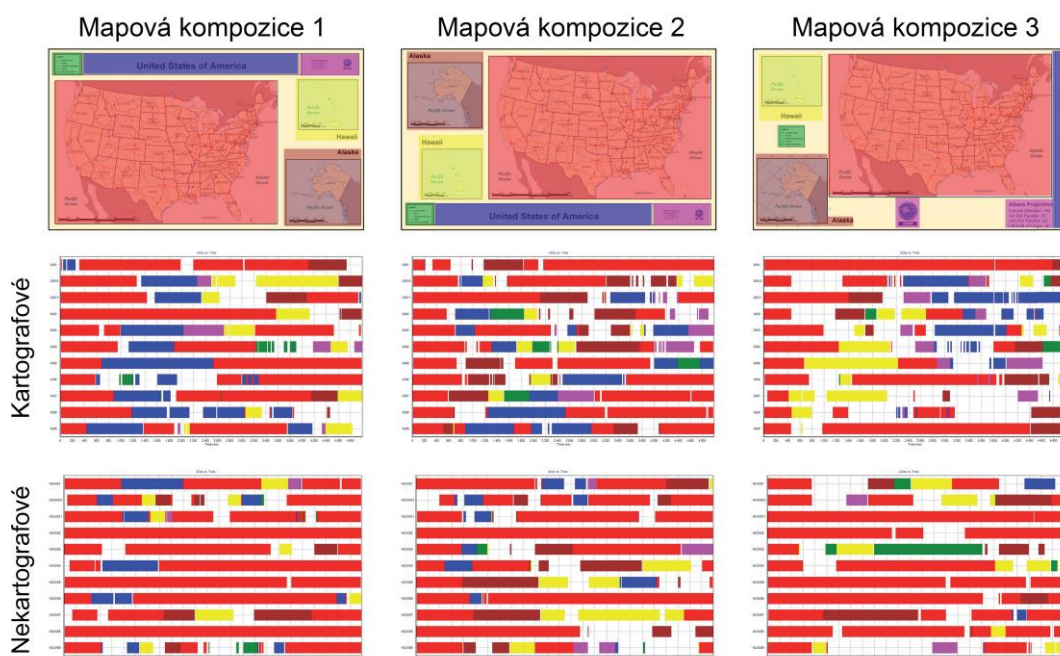
Oblasti zájmu jsou využívány při tvorbě attention map metodou **Gridded AOI** (podkapitola 4.2.3). Podobného principu je využito také v metodě analýzy dat, kdy je nad stimulem vytvořena pravidelná síť AOI a pro jednotlivé buňky jsou vypočítány eye-tracking metriky. Tato metoda byla představena v práci Kristien Ooms (2014) a její modifikace je využita i při hodnocení vlivu stínování na turistických mapách (podkapitola 5.2). Tvorbu pravidelné sítě AOI podporuje jak program BeGaze, tak OGAMA. V obou programech je však vytvoření této sítě limitováno maximálním počtem AOI (BeGaze 16x16, OGAMA 26x26). Dalším problémem je nemožnost nastavit velikost sítě různou od velikosti stimulu. Není tedy možné vytvořit síť pouze pro určitou část stimulu (např. pouze mapu bez okrajů). Z toho důvodu vytvořil student Michal Kučera ve své bakalářské práci (Kučera, 2014) program COTOS. Jednou z jeho funkcí je právě generování sítě oblastí zájmu, přičemž počet buněk není omezen a je možné nastavit souřadnice počátku a konce této sítě. Eye-tracking metriky pro jednotlivé buňky lze zobrazit v tabulkovém procesoru (např. MS Excel) a pomocí podmíněného formátování je obarvit. V případě porovnávání několika verzí stejného stimulu lze využít matematických operací (např. odečítání) a tak zjistit, ve kterých částech stimulu došlo k nárůstu či poklesu hodnoty vybrané eye-tracking metriky. Ukázka této analýzy je na obrázku 23, kde je zobrazena metrika počtu fixací na dvou variantách turistické mapy. Vlevo jsou data pro mapu bez stínování, uprostřed pak pro mapu stejného území se stínováním. Nejvyšší počet fixací byl zaznamenán v buňce označené červenou barvou a nápisem „odpověď“. Na obrázku vpravo je rozdíl hodnot obou map. V případě, že jsou v buňkách na obrázku vpravo kladné hodnoty (červené odstíny), byl vyšší počet fixací zaznamenán v mapě se stínováním. V případě že větší počet fixací byl zaznamenán v mapě bez stínování, jsou v buňkách záporné hodnoty (modré odstíny).

Otázka 5 - Obec	16a - "Řestoky"										16b - "Jenišovice"										Rozdíl Se stínováním - Bez stínováním									
	30	37	29	42	71	42	43	18	4	21	20	30	30	46	75	52	56	29	3	17	-10	-7	1	4	4	10	13	11	-1	-4
22	4	24	68	22	6	27	40	5	26	24	5	8	60	15	8	44	36	8	8	2	1	-16	-8	-7	2	17	-4	3	-18	
28	69	67	76	100	50	7	41	36	28	33	45	50	59	70	67	18	108	odpověď	16	5	-24	-17	-17	-30	17	11	67	odpověď	-12	
5	odpověď	122	20	66	3	0	16	12	32	6	34	6	13	61	6	0	29	32	21	1	odpověď	-116	-7	-5	3	0	13	20	-11	
33	16	10	63	17	0	29	51	30	19	29	11	5	41	9	0	21	42	24	13	-4	-5	-5	-22	-8	0	-8	-9	-6	-6	

Obr. 23 Počet fixací v pravidelné síti buněk nad turistickou mapou. Hodnoty pro mapu bez stínování (vlevo), se stínováním (uprostřed) a rozdíl obou variant (vpravo)

Pomocí oblastí zájmu lze vizualizovat respondentovo chování v rámci sledovaného stimulu. Příkladem jsou metody vizualizace Sequence Chart a Binning Chart, obsažené v softwaru SMI BeGaze.

Sequence Chart zobrazuje časovou posloupnost navštívených oblastí zájmů. Je z něj tedy patrné, kam se respondenti podívali nejdříve a kam později. Ukázka využití Sequence Chart při analýze kompozice mapy je znázorněna na obrázku 24.



Obr. 24 Sequence Chart dvou skupin respondentů (kartografové a nekartografové) pro tři různé mapové kompozice. Skupina respondentů s kartografickým vzděláním se mnohem déle dívala na oblast zájmu představující titul mapy.

V experimentu byly vytvořeny tři mapové kompozice s rozdílně umístěnými kompozičními prvky. Těmito prvky byly mapové pole, titul, legenda, tiráž a dvě vedlejší mapy. Cílem experimentu bylo zjistit rozdílnost vnímání mapy jako celku uživateli s kartografickým vzděláním a laiky. V Sequence Chartu na obrázku 24 jsou fixace umístěné v oblasti zájmu pokrývající titul mapy označené modrou barvou. Je patrné, že respondenti – kartografové strávili v této oblasti delší čas než respondenti – nekartografové, a to i v případě netradičně umístěného titulu mapy pod mapovým polem či svisle vedle něj.

Binning Chart ukazuje statistický přehled navštívených oblastí zájmu pro časové řezy. Pro každý řez je zobrazeno, kolik procent z tohoto času respondenti strávili pohledem v konkrétní oblasti zájmu.

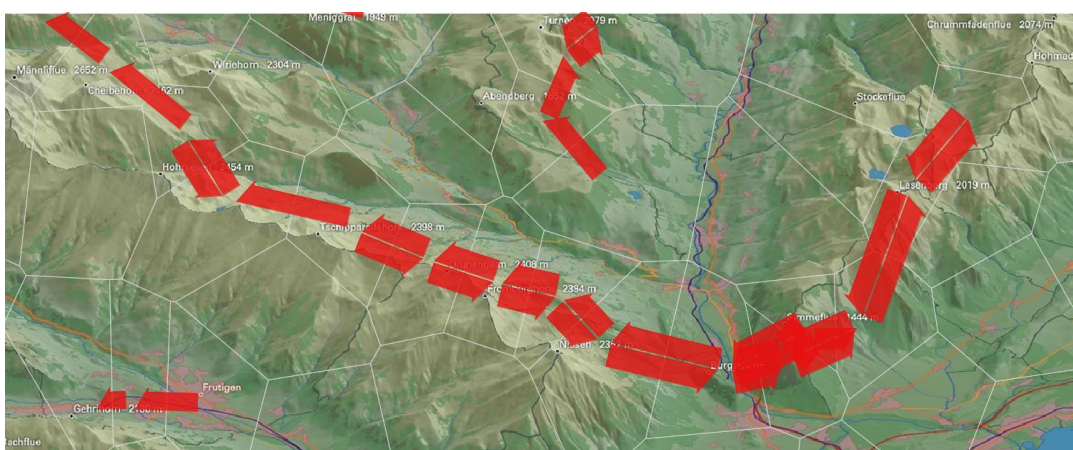
Analýzy využívající oblasti zájmu jsou velmi vhodné zejména v případech, kdy stimulus obsahuje jednoduše rozlišitelné prvky, okolo kterých mohou být oblasti zájmu zakresleny. Typickým příkladem jsou kompoziční prvky mapy. Při vytváření oblastí zájmu je nutné uvažovat s nepřesností při měření a zakreslit oblast zájmu větší než vlastní prvek stimulu. V případě, že stimulus neobsahuje jednoduše rozlišitelné části, kolem kterých by bylo vhodné oblasti zájmu zakreslit, lze využít rozdělení pomocí pravidelné sítě.

4.2.5. GIS analýzy v programu V-Analytics

Protože eye-tracking data jsou data časoprostorová, lze je kromě specializovaných aplikací pro analýzu a vizualizaci eye-tracking dat (BeGaze, OGAMA, eyePatterns) analyzovat pomocí GIS nástrojů. Pro tyto analýzy byl zvolen software V-Analytics, který je určen pro vizuální analýzu časoprostorových a pohybových dat. Souhrn možností této aplikace popisuje Andrienko (2012). Kromě již výše zmíněného porovnávání průběhu trajektorií a vizualizace pomocí Space-Time-Cube byly využity analýzy FlowMap a TimeLine.

Metoda **FlowMap** představuje výsledky diskrétní prostorové a časoprostorové agregace trajektorií. Vizualizace je tvořena šipkami reprezentujícími pohyb pohledu více uživatelů mezi jednotlivými oblastmi stimulu. Tyto oblasti jsou vytvořeny v závislosti na místa fixací v rámci stimulu. Tloušťka šipek je odvozena z počtu přesunů pohledu mezi těmito polygony.

Nejprve je nutné nastavit způsob tvorby Thiessen polygonů a generalizovaných trajektorií. Následně je nastaven parametr odpovídající tloušťce šipek. Zvolen byl „N of moves“, tedy počet trajektorií. Posledním krokem je výběr šipek, které budou zobrazeny. Na obrázku 25 byly vyfiltrovány pouze šipky představující devět a více přesunů pohledu mezi Thiessen polygony. Úkolem respondentů v tomto případě bylo na stimulu nalézt vrchol Simme flue o výšce 1444 m n. m. Z vizualizace je patrné, že většina trajektorií pohybu očí byla soustředěna do oblasti hřebenu.

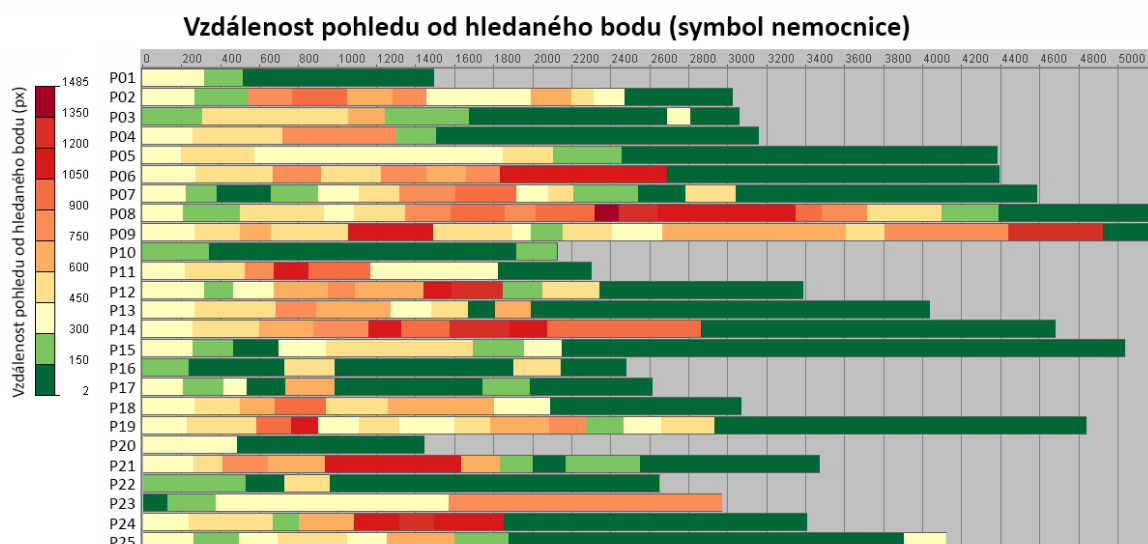


Obr. 25 Vizualizace počtu trajektorií oka metodou FlowMap

Při použití metody FlowMap je stejně jako v případě attention map nezbytné počítat s tím, že výsledek zobrazuje agregovaná data za větší počet respondentů. Z výstupu není možné rozpoznat, zda není ovlivněn jedním respondentem s odlišným chováním.

Druhou metodou analýzy dat v programu V-Analytics je **TimeLine**. Jejím výstupem je graf zobrazující vzdálenost pohledu od určitého objektu ve stimulu v čase. Tato metoda byla použita v případě, že úkolem respondentů bylo nalézt v mapě určitý objekt.

Na výstupu metody TimeLine (obr. 26) jsou zobrazeny barevné pruhy, reprezentující vzdálenost pohledu od hledaného objektu pro jednotlivé respondenty. Na horizontální ose je zobrazen čas udávaný v milisekundách. Barevná škála odpovídá vzdálenosti v pixlech na monitoru. U většiny respondentů byla první fixace zaznamenána ve vzdálenosti 300 – 400 px od hledaného objektu (žlutá barva). Díky fixačnímu kříži se totiž většina respondentů na začátku trialu dívala do středu monitoru. Poslední fixace byla zaznamenána v blízkosti hledaného objektu (do 150 px; tmavě zelená barva).



Obr. 26 Výstup metody TimeLine programu V-Analytics

Výstup metody TimeLine poskytuje názorný přehled o délce trvání trialu a vzdálenosti pohledu od určitého místa ve stimulu. Tím může být hledaný objekt (jako v případě obrázku 26), nebo jakýkoliv bod nebo oblast ve stimulu, která je objektem zkoumání. Může se jednat například o legendu mapy. Nevýhodou metody TimeLine je redukce prostorové složky na pouhou vzdálenost od zvoleného místa a ztráta vazby s vlastním stimulem.

4.2.6. Manuální analýza dat

Manuální analýza eye-tracking dat spočívá v manuálním zaznamenávání jednotlivých činností, které respondent při sledování stimulu vykonával. Tato metoda bývá nejčastěji využívána při analýze dynamických stimulů. Těmi jsou například stimuly typu screen recording nebo data zaznamenaná pomocí mobilního eye-trackeru umístěného v brýlích.

Metodu je výhodné použít v případě, že by byla tvorba oblastí zájmu příliš časově náročná. Při použití výše uvedených dynamických stimulů je stimulus (záznam obrazovky, videozáznam) pro každého respondenta unikátní. Oblasti zájmu by tedy bylo nutné vytvořit pro každého respondenta. Problematické je také vytváření pohybujících se oblastí zájmu.

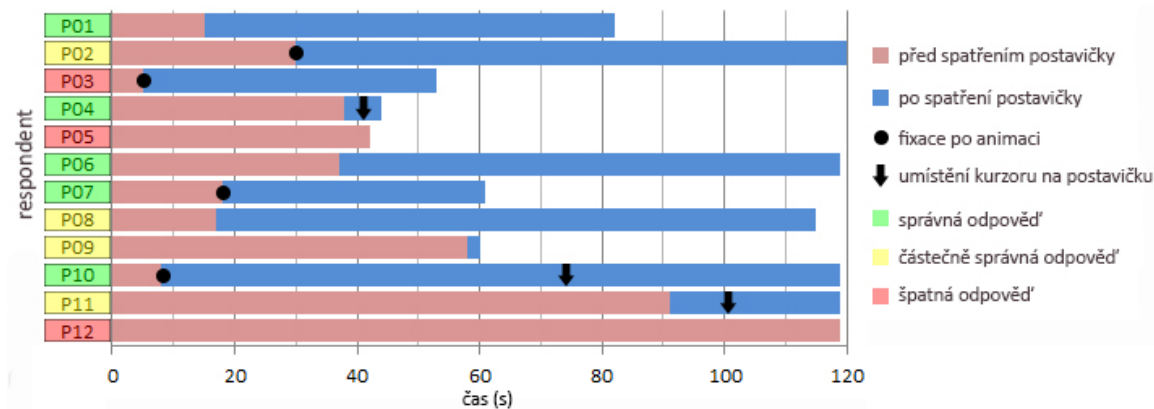
V těchto případech je tedy časově méně náročné projít jednotlivé videozáznamy políčko po políčko (snímání většinou probíhá s frekvencí 24 snímků za vteřinu) a do tabulky zaznamenávat jednotlivé úkony, které respondent prováděl společně s časovým údajem, kdy se tak stalo. Výsledky je potom možné zobrazit například pomocí přehledného grafu.

Tato metoda byla na katedře geoinformatiky UP v Olomouci využita například při vyhodnocení interaktivní práce ve vizuálních programovacích jazycích (Otevřelová, 2014) nebo hodnocení e-learning portálu (Popelka a kol., 2014). V tomto případě bylo zjišťováno, zda respondenta zaujme animovaná postavička průvodce portálem. Při přesunutí kurzoru myši nad tuto postavičku se uživateli portálu ukáží doplňkové informace.

Tab. 9 Manuálně zaznamenané informace o chování respondenta při řešení úkolu v e-learning portálu

Respondent	Délka trialu	Fixace na postavičce	Fixace proběhla ihned po animaci	Kurzor myši na postavičce
P01	1:22	0:15	NE	NE
P02	2:00	0:30	ANO	NE
P03	0:53	0:05	ANO	NE
P04	0:44	0:38	NE	ANO (0:41)
P05	0:42	0:42	NE	NE
P06	1:59	0:37	NE	NE
P07	1:01	0:18	ANO	NE
P08	1:55	0:17	NE	NE
P09	1:00	0:58	NE	NE
P10	1:59	0:08	ANO	ANO (1:14)
P11	1:59	1:31	NE	ANO (1:31)

Do tabulky 9 byla zaznamenána celková délka trialu, čas první fixace na postavičce, zda se tak stalo bezprostředně po její animaci a také to, zda respondent nad tuto postavičku přesunul kurzor myši a zobrazil si tak doplňkové informace. Informace obsažené v tabulce byly následně zobrazeny formou grafu (Obr. 27).



Obr. 27 Vizualizace dat obsažených v tabulce 9 formou grafu

4.2.7. Statistické vyhodnocení eye-tracking dat

Jedním z nejčastějších způsobů analýzy eye-tracking dat je statistické vyhodnocení eye-tracking metrik. Pouze několik eye-tracking metrik je možné odvodit přímo z prvotních naměřených (raw) dat. Jedná se například o velikost zornice. Většina metrik je odvozena z klasifikovaných eye-tracking dat, tedy identifikovaných fixací a sakád, popřípadě počtu mrknutí oka, délky trajektorie (spojnice fixací) oka atd. Eye-tracking metriky mohou být vztaženy ke stimulu jako celku, často jsou však využívány pro ohodnocení jednotlivých oblastí zájmu (AOI).

Holmqvist (2011) rozděluje eye-tracking metriky do čtyř kategorií v závislosti na zkoumané proměnné. Jedná se o:

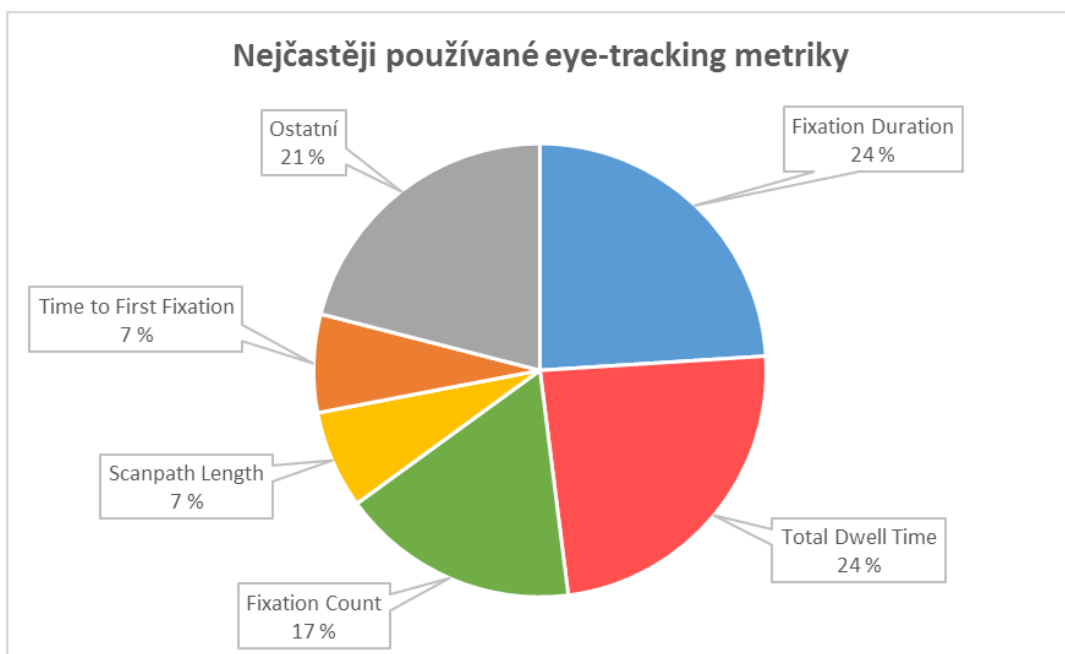
- Pohyb oka (Movement measures)
- Pozice oka (Position measures)
- Počet pohybů (Numerosity measures)
- Reakční čas a vzdálenost (Latency and Distance measures)

Pomocí analýzy pohybu oka (**Movement measures**) je možné odpovědět například na následující otázky: Kterým směrem, jakou rychlostí a jak dlouho se oko v určitém čase pohybovalo, jaký tvar a délku měla trajektorie pohybu oka nebo v jakém pořadí byly navštíveny definované oblasti zájmu. Mezi analýzy pohybu patří také velká skupina analýz porovnávající podobnost trajektorií pohledu (Scanpath comparison) a metrika Scanpath Length.

Do druhé skupiny analýz eye-tracking dat (**Position measures**) patří analýzy zaměřené na určení pozice oka, tedy na místo, kam se v určitém čase respondent dívá. Těmito metodami lze například zjistit, která část stimulu respondenty zaujala, kolik času strávili v jednotlivých oblastech zájmu nebo jaké jsou rozdíly v rozložení fixací v rámci stimulu mezi jednotlivými skupinami respondentů. Mezi Position measures patří např. Fixation Duration nebo Total Dwell Time.

Pomocí **Numerosity measures** lze zjistit počet fixací, sakád či mrknutí, ale například také to, kolikrát se respondent pohledem vrátil do definované oblasti zájmu. Mezi Numerosity measures patří například metrika Number of Fixations.

Poslední skupina analýz eye-tracking dat (**Latency and Distance measures**) se zabývá vzdálenostmi a zpožděním jedné události za druhou. Jedná se například o vzdálenost pohledu od kurzoru myši nebo o čas, který uběhl od začátku experimentu po první fixaci v určité oblasti.



Obr. 28 Nejčastěji používané eye-tracking metriky používané v kartografických studiích. Data převzata z tabulky 2 na straně 16.

Eye-tracking metrik existuje obrovské množství. Holmqvist (2011) zmiňuje více než 120 eye-tracking metrik a uvádí, že stále vznikají nové. Holmqvist dále uvádí, že mnohé z těchto metrik byly využity pouze v jedné práci jednoho autora. V praxi nejčastěji používá pouze několik nejvýznamnějších metrik. Tabulka 2 na straně 18 shrnuje nejvýznamnější eye-

tracking studie z oblasti kartografie. V jejím posledním sloupci jsou uvedeny využitě metody analýzy a eye-tracking metriky. Eye-tracking metriky využívané v kartografii jsou shrnuty v grafu na obrázku 28.

Na základě statistické analýzy eye-tracking metrik je možné vyhodnotit, jak respondent vnímá sledovaný obraz. Poole a Ball (2005) z katedry psychologie university v Lancasteru shrnuli nejčastěji používané eye-tracking metriky a interpretaci jejich výsledků.

Z obrázku 28 je patrné, že často využívanou eye-tracking metrikou je **Fixation Duration** (position measures), neboli délka fixace udávaná v milisekundách. Tato metrika bývá někdy také označována jako Fixation Length. Delší fixace naznačují potíže při získávání informací nebo ukazují na vyšší poutavost daného objektu (Just a Carpenter, 1976).

Mnohé studie využívají také metriku **Total Dwell Time** (Position measures), označovanou také jako Total Viewing Time, Observation Length nebo Search Time. Tato metrika se udává v milisekundách nebo procentu z celkového času trialu a je využívána především při analýze oblastí zájmu, kdy její výsledek udává, kolik času respondenti strávili pohledem v definované oblasti.

Metrika **Fixation Count** (Numerosity measures) popisuje počet fixací zaznamenaných během sledování stimulu, případně ve vymezené oblasti zájmu. Větší počet fixací indikuje nízký stupeň efektivity vyhledávání nebo nevhodné uživatelské rozhraní hodnocené aplikace (Goldberg a Kotval, 1999). Uživatel těká z místa na místo a nenachází odpověď.

Z Fixation Count je odvozena metrika **Fixation Frequency**, která udává počet fixací zaznamenaných za sekundu. Oproti Fixation Count má tu výhodu, že udává relativní hodnotu, není tedy ovlivněna různou délkou trialu u jednotlivých respondentů. Tuto metriku často užívá například Kristien Ooms (2014).

Metrika **Scanpath Length** (Movement measures) popisuje délku trajektorie oka v rámci stimulu. V závislosti na její velikosti je možné odvodit obtížnost otázky nebo srozumitelnost stimulu. Délku je možné měřit v pixelech, milisekundách nebo počtu fixací (Goldberg a Helfman, 2011).

Poslední v kartografii více využívanou metrikou je **Time to First Fixation** (Latency measures). Tato metrika se používá téměř výlučně pro hodnocení oblastí zájmu, kdy udává čas, v němž byla zaznamenána fixace v určité oblasti. Nižší čas ukazuje na vyšší schopnost upoutat uživatele.

Kromě pěti výše zmíněných v kartografii nejčastěji používaných eye-tracking metrik někteří kartografové využili také metriky Number of Refixations, Time to First Click, Pupil Diameter nebo metriky studující sakády (Saccade Amplitude, Saccade Duration nebo Number of Saccades) – viz tabulka 2 na straně 18.

Ve většině případů obsažených v této práci dochází ke statistickému srovnání eye-tracking metrik pro dvě skupiny (2D vs. 3D varianta mapy, kartograf vs. nekartograf). Dochází tedy ke srovnání dvou datových sad a ve většině případů je využito dvouvýběrového Wilcoxonova testu. Tento neparametrický test byl zvolen místo Studentova T-testu, protože ve většině případů neodpovídala sledovaná veličina Gaussovu normálnímu rozdělení. V případě srovnávání více než dvou datových sad je místo Wilcoxonova testu možné použít Kruskal-Wallisův test, který je neparametrickou obdobou jednoduchého třídění analýzy rozptylu (ANOVA) a je přímým zobecněním Wilcoxonova dvouvýběrového testu na případ k výběrů ($k \geq 3$) (Pavelka a Klímek, 2000).

4.3. Volba metody analýzy E-T dat

Výsledkem řešení dílčího cíle je postup výběru vhodné metody analýzy eye-tracking dat zaznamenaných při sledování stimulů s kartografickou tematikou. V podkapitole 4.2 bylo popsáno 15 metod analýzy eye-tracking dat, avšak obecně existuje pro analýzu těchto dat mnohem větší počet metod. Ty však nejsou v kartografickém výzkumu využívány, proto nebyly v disertační práci popsány. Jedná se například o analýzu mikropohybů oka nebo tvaru sakád, zaznamenané vysokorychlostním eye-trackerem, analýzu čtení textu, sledování velikosti zornice a další.

Vybraných 15 metod analýzy eye-tracking dat bylo zvoleno na základě autorových zkušeností a studia odborných článků zabývajících se využitím eye-trackingu v kartografii. Tabulka 2 na straně 18 obsahuje souhrn nejvýznamnějších eye-tracking studií s kartografickou tematikou. Většina autorů použila statistickou analýzu eye-tracking metrik. Pro vizualizaci výsledků použili nejčastěji metody Scanpath, Attention maps nebo Gridded AOI. Metod vizualizace eye-tracking dat existuje mnohem více, avšak v praxi nejsou příliš využívány. Přehled metod vizualizace eye-tracking dat shrnuje Blascheck (2014). Většina z popsaných metod však byla představena pouze v jednom článku, jehož cílem bylo vytvoření a otestování metody vizualizace, spíše než analýza konkrétních eye-tracking dat. Použití metod je závislé na konkrétní aplikaci, pro kterou byly vytvořeny, a z toho důvodu nejsou příliš rozšířené. Příkladem je metoda vizualizace přesunů pohledu mezi oblastmi zájmu nazvaná ThemeRiver (Havre a kol., 2002).

Při výběru vhodné metody pro analýzu eye-tracking dat by se měl analytik řídit především informační hodnotou výstupu analýzy – tedy co je výstupem metody a k čemu může sloužit. Tabulka 10 stručně shrnuje výstupy všech patnácti metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat popsaných v disertační práci.

Tab. 10 Výstupy popsaných metod analýzy eye-tracking dat

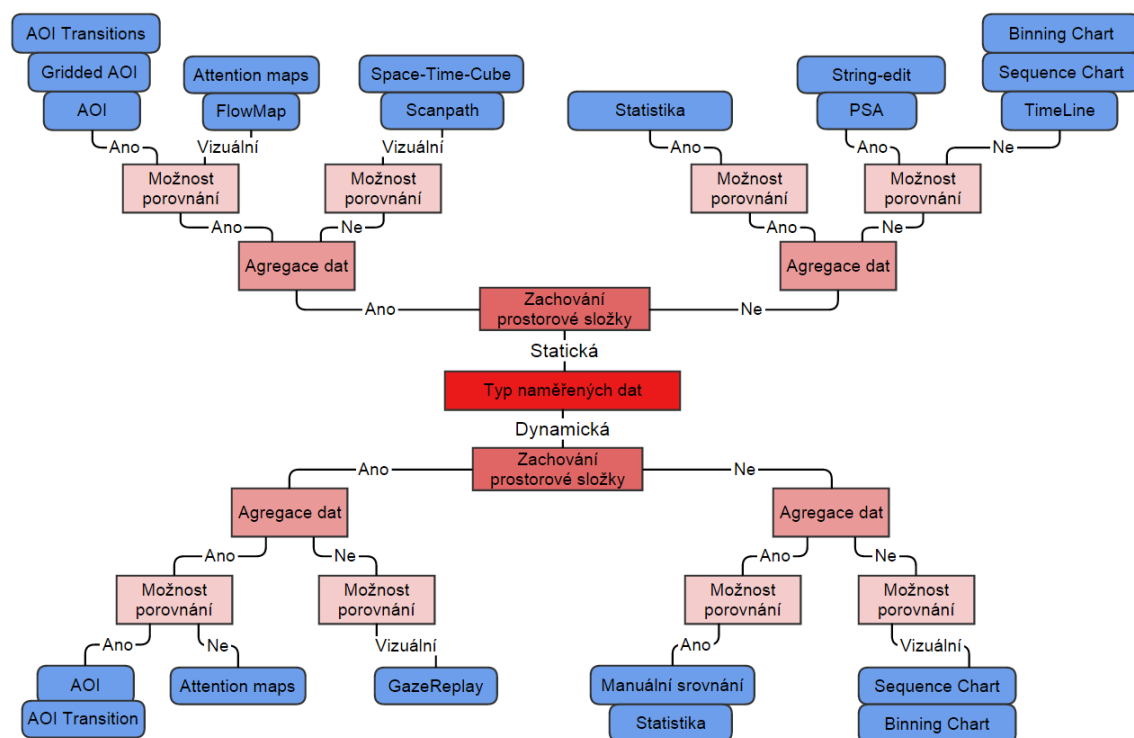
Metoda	Výstup
GazeReplay	Videozáznam s průběhem trajektorie pohledu
Scanpath	Průběh trajektorie pohledu
STC	Průběh trajektorie pohledu v 3D
String-edit distance	Statistické a grafické porovnání uživatelů dle pořadí navštívených AOI
PSA	Statistické a grafické porovnání uživatelů dle průběhu trajektorie
Attention maps	Attention mapa zobrazující exponovaná místa stimulu
AOI	Statistické porovnání E-T metrik v jednotlivých oblastech zájmu
AOI Transitions	Zobrazení přesunů pohledu mezi jednotlivými AOI
Gridded AOI	Statistické porovnání E-T metrik v gridu nad stimulem
Sequence Chart	Graficky znázorněné pořadí navštívených AOI
Binning Chart	Statistický přehled navštívených oblastí zájmu pro časové řezy
FlowMap	Agregovaná trajektorie pohledu pro více uživatelů
TimeLine	Graf vzdálenosti pohledu od určitého bodu v čase
Manuální analýza	Tabulka se záznamem jednotlivých činností uživatele
Statistická analýza	Statistické porovnání E-T metrik

Výstupy popsaných metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat jsou různě názorné. K prezentaci výsledků eye-tracking testování před laickou veřejností se velmi často využívají Attention mapy, které jsou pro nezkušené uživatele díky své intuitivnosti velmi snadno pochopitelné. Pro hlubší analýzu pohybů oka je však vhodnější zvolit jiné metody, jako je například statistická analýza. Každá z metod je vhodná k jinému účelu, a proto by bylo exaktní porovnání názornosti výstupů jednotlivých metod velmi obtížné.

Rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace E-T dat

Výběr metody analýzy eye-tracking dat také závisí na typu naměřených dat, protože všechny metody nejsou vhodné pro všechny typy naměřených dat. Při řešení prvního dílčího cíle autor vytvořil rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy eye-tracking dat (obr. 29). Toto schéma obsahuje čtyři kritéria rozhodování, na základě jejichž volby se vybírá vhodná metoda, a to:

- Typ naměřených dat
- Zachování prostorové složky
- Agregace dat
- Možnost porovnání



Obr. 29 Rozhodovací schéma výběru metody analýzy eye-tracking dat z hlediska vhodnosti metody

Při výběru vhodné metody je důležitý především výběr metody v závislosti na **typu naměřených** dat. V případě, že byla data zaznamenána nad dynamickým stimulem (video, záznam obrazovky), je nutné použít jiné metody analýzy než v případě statického stimulu (statický obrázek, text). Dalším důležitým faktorem při výběru metody analýzy je fakt, zda zůstane zachována vazba na **prostorovou složku** dat, tedy zda bude výsledek metody analýzy možné vztáhnout k určité části stimulu, nebo zda budou data schematizována. Příkladem je metoda porovnání průběhu trajektorií metodou String Edit Distance, pro jejíž použití je prostorové rozmístění fixací nahrazeno písmenem reprezentujícím oblast zájmu, ve které byla fixace zaznamenána. Kritérium **agregace dat** popisuje, zda jsou výsledná data agregována pro všechny

uživatele (nebo jejich skupiny), nebo jsou rozlišitelné záznamy pohybu oka jednotlivých respondentů. Příkladem metody, kde k agregaci dat dochází, je Attention map. Z výsledné mapy není možné rozpoznat pohledy jednotlivých uživatelů. Opačným příkladem je metoda Scanpath, která zobrazuje trajektorie pohledu pro jednotlivé uživatele zvlášť. Posledním uvažovaným kritériem rozhodování je **možnost porovnání** uživatelů nebo jejich skupin mezi sebou. Některé metody jsou pro toto srovnání přímo určené, případně je jejich výstupem numerické porovnání určité vlastnosti chování uživatelů. Jiné metody umožňují pouze vizuální porovnání. Typickým příkladem porovnání uživatelů jsou metody Scanpath Comparison, jejichž výstupem je číselné nebo grafické srovnání podobnosti trajektorií jednotlivých uživatelů. Attention mapy vytvořené pro dvě různé skupiny uživatelů je však možné porovnat pouze vizuálně.

Kromě čtyř kritérií rozhodovacího schématu lze metody rozlišovat podle toho, zda využívají prvotní naměřená (raw) data či klasifikovaná data ve formě fixací a sakád. Toto kritérium není v rozhodovacím schématu obsaženo, protože z pohledu analytika není příliš důležité. Tabulka 11 obsahuje v posledním sloupci parametr ukazující, zda jsou ve zvolené metodě využitelné eye-tracking metriky. Tento parametr nebyl do schématu zahrnut jako rozhodovací kritérium, protože ve většině případů nejsou eye-tracking metriky využitelné a rozhodovací schéma by bylo příliš rozsáhlé, nepřehledné a pro uživatele (analytika) nepoužitelné.

Tab. 11 Srovnání metod analýzy eye-tracking dat z hlediska jejich vhodnosti použití

Metoda	Dynamická data	Statická data	Zachování prostorové složky	Agregace dat	Možnost porovnání	Raw data	Klasifikovaná data	Eye-tracking metriky
GazeReplay	ANO	NE	ANO	NE	Vizuální	ANO	ANO	NE
Scanpath	NE	ANO	ANO	NE	Vizuální	ANO	ANO	NE
STC	NE	ANO	ANO	NE	Vizuální	ANO	ANO	NE
String-edit distance	NE	ANO	NE	NE	ANO	NE	ANO	NE
PSA	NE	ANO	NE	NE	ANO	NE	ANO	NE
Attention maps	ANO	ANO	ANO	ANO	Vizuální	ANO	ANO	NE
AOI	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
AOI Transitions	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	NE
Gridded AOI	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO
Sequence Chart	ANO	ANO	NE	NE	Vizuální	ANO	ANO	NE
Binning Chart	ANO	ANO	NE	NE	Vizuální	ANO	ANO	NE
FlowMap	NE	ANO	ANO	ANO	Vizuální	NE	ANO	NE
TimeLine	NE	ANO	NE	NE	Vizuální	NE	ANO	NE
Manuální analýza	ANO	NE	NE	ANO	ANO	NE	ANO	ANO
Statistická analýza	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	NE	ANO	ANO

Výběr podle náročnosti a rychlosti metody analýzy a vizualizace E-T dat

Základní metody analýzy eye-tracking dat (Attention Maps, Scanpath, GazeReplay) jsou obsaženy ve většině softwarových aplikací pro analýzu eye-tracking dat. V disertační práci byl pro záznam využit software SMI BeGaze dodávaný k zařízení SMI RED 250.

SMI BeGaze umožňuje export prvotních (raw) dat i dat klasifikovaných na fixace a sádky. Pro další metody analýzy, které nejsou v tomto základním softwaru obsaženy, je nutné data převést do formátu akceptovaného aplikacemi, které tyto metody analýzy umožňují. Pro převod dat do prostředí open-source aplikace OGAMA byl využit nástroj COTOS, vzniklý jako jeden z výstupů bakalářské práce Kučery (2014), jejíž vedoucím byl autor disertace. Pro analýzu dat v programu V-Analytics byl použit nástroj vytvořený Kristien Ooms (2012a). Dostupnost těchto nástrojů umožnila využití dalších aplikací. Přesto je instalace, seznámení s ovládáním, převod dat a analýza eye-tracking dat v neznámém prostředí technicky i časově náročná. Tyto faktory mohou ovlivnit operátora (analytika) při výběru metody analýzy. Náročnost a rychlost zpracování dat by však neměly být primárními kritérii pro výběr vhodné metody. Doporučené aplikace pro použití popsaných metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat jsou uvedené v tabulce 12. V posledním sloupci tabulky je rovněž uvedena časová a technická náročnost použití jednotlivých metod získaná z expertního odhadu autora na základě jeho zkušeností. Při hodnocení byla uvažována nutnost převodu dat mezi aplikacemi, časová náročnost přípravy dat a testování různých nastavení tvorby výstupu. Metody byly ohodnoceny pomocí hvězdiček, přičemž platí, že čím větší počet hvězdiček, tím je použití analýzy náročnější. Jednou hvězdičkou byly ohodnoceny metody, které jsou přímo součástí programu SMI BeGaze a kde není nutná žádná úprava dat. Pěti hvězdičkami byly ohodnoceny metody, u kterých je nutné užití pokročilých funkcí dalších softwarů a náročné testování možností nastavení (STC, PSA), nebo je jejich použití časově velmi náročné (tvorba AOI, manuální analýza).

Tab. 12 Srovnání metod analýzy eye-tracking dat z hlediska náročnosti a rychlosti jejich použití

Metoda	Použitý software	Náročnost
GazeReplay	BeGaze, OGAMA	*
Scanpath	BeGaze, OGAMA	*
STC	V-Analytics, GeoTime, Voxler	*****
Scanpath Comparison – String-edit distance	OGAMA + eyePatterns	****
Scanpath Comparison – PSA	V-Analytics	*****
Attention maps	BeGaze, OGAMA	*
AOI	BeGaze, OGAMA, V-Analytics	*****
AOI Transitions	BeGaze, OGAMA	***
Gridded AOI	BeGaze, OGAMA	****
Sequence Chart	BeGaze	**
Binning Chart	BeGaze	**
FlowMap	V-Analytics	****
TimeLine	V-Analytics	***
Manuální analýza	Tabulkový procesor	*****
Statistická analýza	R, Statistica, SPSS a další	****

Předchozí podkapitoly obsahují popis 15 metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat. Při analýze dat naměřených během experimentu je vhodné použít více metod současně. Některé z jednodušších metod analýzy, mezi které patří například GazeReplay, Scanpath nebo Attention maps, nejsou obvykle součástí výsledků analýzy, přesto je vhodné je použít, protože slouží pro základní kontrolu dat, umožňují analytikovi získat představu o rozložení fixací či je pomocí nich možné objevit chyby v naměřených datech.

Při analýze dat naměřených v průběhu sedmi eye-tracking experimentů bylo ve většině případů využito statistické analýzy eye-tracking metrik v kombinaci s některou z metod vizualizace výsledků. Tabulka 13 shrnuje metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat a testované eye-tracking metriky použité při řešení druhého dílčího cíle disertační práce.

Tab. 13 Metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat použité v disertační práci

Dílčí cíl	Experiment	Metoda	Analyzované E-T metriky
DC 2A – Reliéf	DualMap	Statistická analýza AOI	Dwell Time
	SingleMap	Statistická analýza Scanpath Comparison Attention Maps FlowMap	Scanpath Length
	Shading – Mapy.cz	Statistická analýza Gridded AOI	Trial Duration Fixation Count Fixation Duration Scanpath Length
DC 2B – Reliéf	Extinct Village	Statistická analýza FlowMap AOI Transitions	Fixation Count Fixation Duration
	3D Cities	Statistická analýza FlowMap TimeLine	Time to Answer Fixation Count Fixation Duration Scanpath Length
DC 2C – Tematický obsah	3D Thematic – Arealis	Statistická analýza AOI AOI Transitions	Trial Duration Fixation Count Fixation Frequency Fixation Duration Scanpath Length
	3D Thematic – Points	Statistická analýza Binning Chart	Trial Duration Fixation Count Fixation Frequency Fixation Duration Scanpath Length

5. DC 2A - PŘÍPADOVÁ STUDIE - 3D REPREZENTACE RELIÉFU

Už na historických mapách je možné nacházet snahu o co nejrealističtější vyjádření reliéfu, tedy vyvolání pseudoprostorového vjemu. K vyvolání 3D efektu bylo využíváno několik metod – symboly kopečků, šrafování nebo stínování (Petrovič a Mašera, 2004). Existuje řada dalších metod, které je možné využít pro vizualizaci terénu. Ve světové literatuře je obsaženo velké množství různých dělení metod znázornění reliéfu.

Slocum (2009) ve své publikaci „Thematic Cartography and Visualization“ uvádí následující metody znázornění reliéfu:

- Šrafy (Hachures)
- Isolinie (Contour Lines)
- Nespojité hypsometrie (Hypsometric Tint)
- Spojité hypsometrie (Continuous-tone Map)
- Mřížka (Fishnet)
- Stereosnímek (Stereopair)
- Anaglyf (Anaglyph)

Dent (1990) uvádí podobné, avšak méně detailní rozdělení, přičemž navíc zmiňuje znázornění s využitím stínování. Vizualizaci pomocí hypsometrie nahradil metodou Surface maps (mapy povrchu):

- Isolinie (Contour Lines)
- Stínované reliéfní mapy (Shaded Relief Map)
- Mřížka (Wireframe Map)
- Mapy povrchu (Surface Map)

Další dělení uvádí Robinson (1995), který na prvním místě popisuje skupinu „Perspective pictorial maps“. Robinson zmiňuje, že tyto perspektivní pohledy jsou s rozvojem technických možností během posledních 50 let využívány stále častěji, a uvádí následující metody vizualizace reliéfu:

- Perspektivní obrázková mapa - blokdiagram (Perspective Pictorial Maps)
- Morfometrická mapa (Morphometric Map)
- Mapa terénních jednotek (Terrain Unit Map)
- Šrafy (Hachures)
- Isolinie (Contour Lines)
- Stínované mapy (Hillshading)

5.1. Hodnocení použitelnosti perspektivních 3D map

V dnešním pojetí jsou za 3D metody (kartografické) vizualizace obvykle vydávány perspektivní pohledy (Voženílek, 2005). Tyto perspektivní mapy jsou využívány stále častěji zejména proto, že běžní uživatelé obtížně čtou běžné 2D topografické mapy, které zobrazují terén vrstevnicemi, stínovaným reliéfem a výškovými body. Perspektivní pohledy je navíc možné kombinovat například s barevnou hypsometrií.

Existují dva způsoby, jak perspektivního promítání využít při vizualizaci reliéfu. Technicky jednodušší je vytvoření statického obrázku, na kterém je zobrazený reliéf zobrazen pod kartografem předem definovaným úhlem. Druhým způsobem je dynamické

zobrazení, které umožní uživateli interaktivní práci s modelem, jeho otáčení a přibližování. Perspektivní mapa obsahuje sémantický i geometrický popis zachyceného prostoru a vizualizace v 3D prostoru, poskytuje uživateli lepší představu o prostorových souvislostech zejména z hlediska výškových rozdílů (Zebedin a kol., 2006).

Při tvorbě statického obrázku je nezbytné pečlivě nastavit (horizontální) natočení samotného modelu a (vertikální) úhel natočení kamery. Nejběžnější je natočení od jihu o 45° západním směrem (Dent, 1990). Vertikální natočení kamery pod úhlem 30° nejlépe vystihne tvar reliéfu (Imhof, 2007). Pro korektní vjem zobrazovaného terénu je rovněž vhodné kombinovat perspektivní pohled se stínováním reliéfu.

Hodnocení použitelnosti perspektivních 3D map bylo doposud prováděno většinou pomocí dotazníkového šetření (např. (Haerberling, 2005; Petrovič a Mašera, 2004; Savage a kol., 2004; Schobesberger a Patterson, 2007)). Eye-tracking byl doposud využit pouze na univerzitě v Helsinkách (Irvankoski, 2012; Putto a kol., 2014). V těchto eye-tracking studiích řešili respondenti prostorové úlohy nad jedním ze tří způsobů vizualizace reliéfu - vrstevnice, stínování a experimentální perspektivní pohled. Autoři eye-tracking studií uvádějí, že největší délky fixací byly naměřeny v případě zobrazení vrstevnic. Nejpomalejší vyhledávání určitého objektu bylo naměřeno při zobrazení experimentálního perspektivního pohledu, což byla stínovaná mapa doplněná o mřížku.

Cílem případové studie popsané v této kapitole bylo analyzovat rozdíly ve vnímání klasických ortogonálních map a jejich ekvivalentů vytvořených pomocí 3D vizualizace. Byly realizovány dva eye-tracking experimenty doplněné o krátký dotazník. Obou experimentů se zúčastnilo 40 respondentů. Polovina z nich byli studenti pregraduálního studia geoinformatiky, kteří absolvovali kurz kartografie. Druhou polovinou respondentů byli studenti jiných oborů, kteří během studia nepřišli s kartografií do styku.

5.1.1. Design E-T experimentů „DualMap“ a „SingleMap“

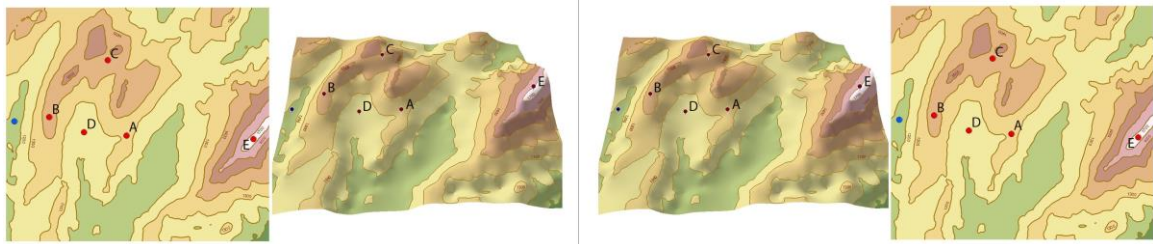
První experiment byl označen jako „DualMap“, protože stimuly vždy obsahovaly dvojici map (2D, 3D) vedle sebe. Hypotézy v DualMap experimentu zněly:

- H1: Respondenti budou v dotazníku preferovat 3D mapu
- H2: Vyšší hodnota Dwell Time bude zaznamenána v AOI okolo 3D mapy
- H3: Vyšší počet odpovědí (kliknutí myši) bude zaznamenán v 3D mapě

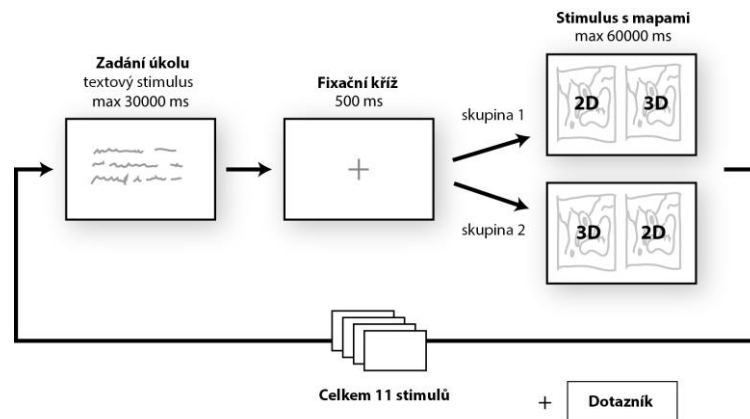
Experiment obsahoval celkem 11 stimulů (viz DVD příloha 1.1 nebo vázaná příloha 1). Všechny použité mapy byly vytvořeny v programu Esri ArcMap a ArcScene. Jako inspirace pro vznik stimulů Q4 – Q8 posloužila studie Savage (2004) z North Carolina State University.

Před zobrazením vlastního stimulu měli respondenti 30 sekund na přečtení a zapamatování otázky. Poté byl na 500 ms zobrazen fixační kříž, který zajistil, že trajektorie pohledu všech respondentů začínala uprostřed stimulu. Následně byl na 60 sekund zobrazen vlastní stimulus. Respondenti odpovídali kliknutím myši přímo do mapy.

Pro zabránění vlivu umístění vizualizace v rámci stimulu (vlevo-vpravo) byly vytvořeny dvě varianty každého stimulu. Na první z nich byla 2D mapa v levé části a 3D vizualizace v pravé části (2D-3D). Ve druhé variantě bylo umístění opačné (3D-2D). Při vlastním testování byla každému uživateli přiřazena náhodná varianta jednotlivých stimulů. Příklad stimulů je na obrázku 30. Celý proces testování je znázorněn na obrázku 31.



Obr. 30 Dvě varianty stejného stimulu DualMap experimentu. Varianta 2D3D (vlevo) a 3D2D (vpravo).

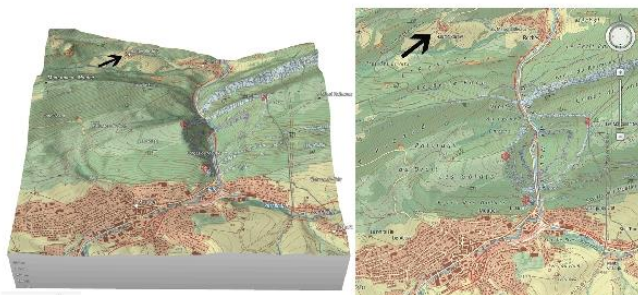


Obr. 31 Design DualMap experimentu. Respondent měl 30 s na přečtení a zapamatování otázky a po krátkém zobrazení fixačního kříže byla na 60 s zobrazena jedna z variant stimulu. Experiment obsahoval celkem 11 stimulů v náhodném pořadí. Po dokončení testování vyplnili respondenti krátký dotazník.

Po skončení eye-tracking experimentu vyplnil každý respondent krátký webový dotazník (viz obr. 32) zaměřený na subjektivní postoj k metodám vizualizace terénu použitých na jednotlivých stimulech. Jednalo se o otázky týkající se přehlednosti, vhodnosti pro nalezení odpovědi a subjektivní názor na estetiku jednotlivých vizualizací.

Otázka č. 1: *

© Samex - 811 - SWA - 3D-2D



Kliknutím označte vyhlídkové body, z nichž je možné vidět místo označené šipkou

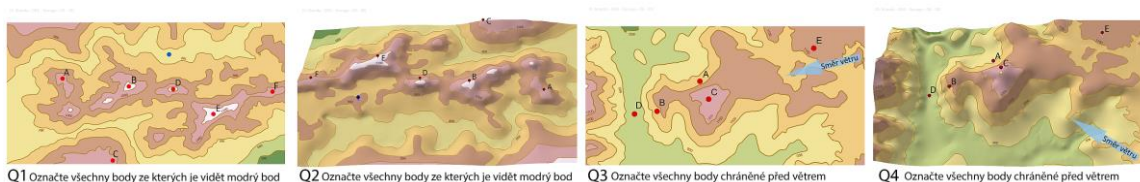
	ANO	NE
Byla 3D mapa (vlevo) přehledná?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Byla 2D mapa (vpravo) přehledná?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Byla 3D mapa vhodnější pro nalezení odpovědi?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Byla 3D mapa estetičtější? Líbila se Vám víc než 2D?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Obr. 32 Otázka č. 1 z webového dotazníku. Celý dotazník je dostupný na adrese http://gisolomouc.own.cz/3D_v4.

Jak bude popsáno dále (podkapitola 5.1.3), výsledky DualMap experimentu byly přes veškerou snahu ovlivněny pořadím vizualizací v rámci stimulu. Z toho důvodu byl vytvořen další experiment, označený jako SingleMap. Hypotézy v tomto experimentu zněly:

- H1: Delší trajektorie pohybu oka bude zaznamenána u nekartografií
- H2: Delší trajektorie pohybu oka bude zaznamenána u 3D varianty stimulu
- H3: Respondenti budou mít jinou strategii při čtení 2D a 3D varianty stimulů

Tento experiment obsahoval celkem 15 stimulů (viz DVD příloha 2.1 nebo vázaná příloha 2), které byly podobné stimulům z DualMap experimentu, avšak každý stimulus obsahoval pouze jeden typ vizualizace (2D nebo 3D). Stimuly byly respondentům prezentovány v náhodném pořadí. Protože se jednalo o within-subject experiment, byla 3D varianta mapy modifikována tak, aby si respondenti nepamatovali odpověď na otázku z 2D varianty. Tato modifikace byla provedena otočením mapového pole nebo drobnými změnami ve stimulu (obr. 33).



Obr. 33 Dvojice stimulů ze SingleMap experimentu. Každý obrázek (Q1 – Q4) je samostatný stimulus

5.1.2. Analýza dotazníku k experimentu „DualMap“

Jako první byla analyzována data z dotazníku, který respondenti vyplnili ihned po skončení DualMap experimentu. Dotazník obsahoval všechny stimuly DualMap experimentu a respondenti u každého z nich odpověděli na 4 otázky:

- Byla 3D mapa přehledná?
- Byla 2D mapa přehledná?
- Byla 3D mapa vhodnější pro nalezení odpovědi?
- Byla 3D mapa estetičtější? Líbila se Vám více než 2D?

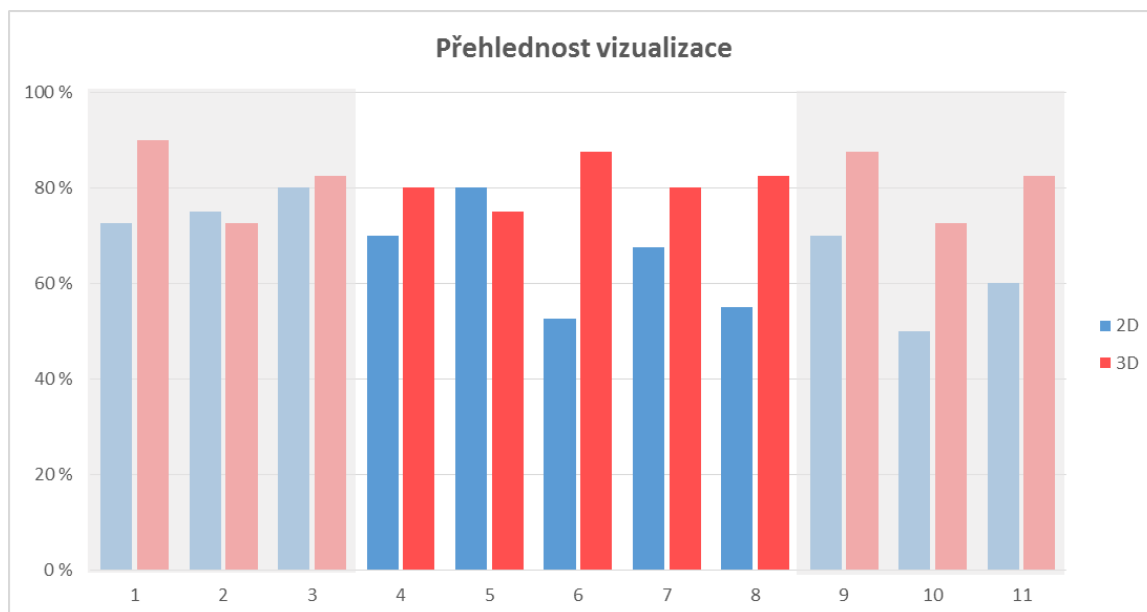
Data z dotazníku byla testována pomocí Wilxonova neparametrického testu a na hladině významnosti $\alpha=0,05$ byl nalezen statisticky významný rozdíl mezi 2D a 3D mapou ve všech třech sledovaných aspektech (přehlednost, vhodnost, estetika). Z tabulky 14 je patrné, že statistickým testováním nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly pro přehlednost, vhodnost ani estetiku map.

Tab. 14 Výsledky hodnocení rozdílu mezi 2D a 3D vizualizací z dotazníku pomocí Wilxonova testu.

	α	W	p-value	výsledek
Přehlednost mapy	0,05	15	0,005	Zamítáme H_0
Vhodnost mapy	0,05	118	<0,001	Zamítáme H_0
Estetika mapy	0,05	211	<0,001	Zamítáme H_0

Přehlednost map

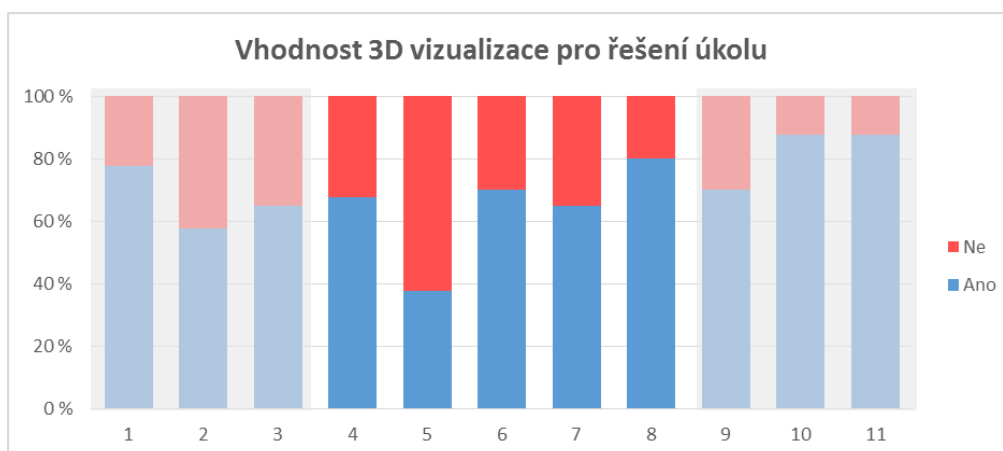
V grafu na obrázku 34 je zobrazen poměr odpovědí na první dvě otázky dotazníku, které se týkaly přehlednosti map z DualMap experimentu. Z grafu je patrné, že respondenti z hlediska přehlednosti spíše preferovali 3D mapu.



Obr. 34 Kladné odpovědi na otázku týkající se přehlednosti 2D a 3D vizualizace ve stimulech DualMap experimentu. Analyzované stimuly Q4-Q8 jsou zvýrazněné.

Vhodnost map

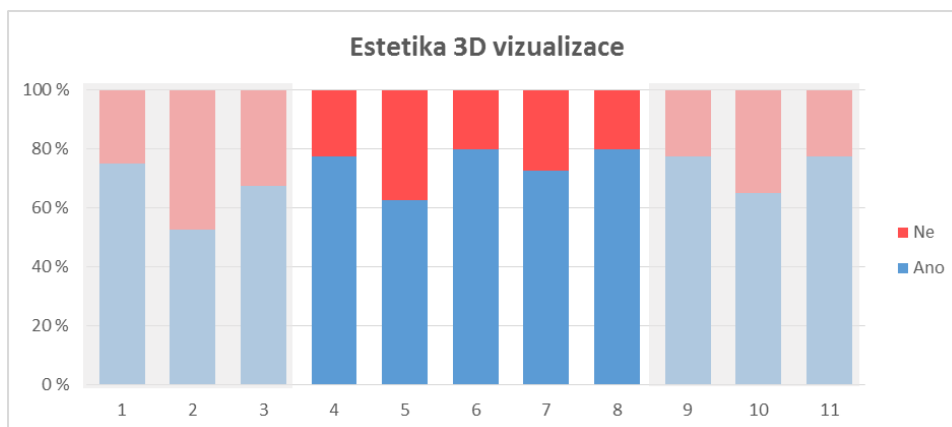
Ve třetí otázce měli respondenti rozhodnout, zda byla pro nalezení správné odpovědi 3D mapa vhodnější než 2D varianta. V 10 případech z 11 zvolila většina respondentů odpověď "Ano". Jedinou výjimkou je otázka Q5 týkající se měření vzdáleností na mapě. Pouze pro tuto otázku byla dle odpovědí respondentů vhodnější 2D vizualizace (viz obr. 35).



Obr. 35 Odpovědi na otázku týkající se vhodnosti 3D vizualizace pro řešení zadaného úkolu ve stimulech DualMap experimentu. Analyzované stimuly Q4-Q8 jsou zvýrazněné.

Estetika map

V poslední otázce dotazníku týkající se estetiky jednotlivých map zvolilo téměř ve všech případech (10 z 11) více než 60 % respondentů 3D variantu jako estetičtější než její 2D ekvivalent (obr. 36).



Obr. 36 Shrnutí odpovědí na otázku týkající se estetiky 3D vizualizace ve stimulech DualMap experimentu. Analyzované stimuly Q4-Q8 jsou zvýrazněné.

Data zobrazená v grafech (obrázky 34, 35 a 36) zahrnují odpovědi všech respondentů. Rozdíly mezi skupinou kartografů a nekartografů byly testovány Wilcoxonovým testem. Na hladině významnosti $\alpha=0,05$ zde nebyl nalezen statisticky významný rozdíl. Analýza odpovědí z dotazníku ukázala, že existuje statisticky významný rozdíl v subjektivních preferencích respondentů mezi 2D a 3D vizualizací v mapách použitých v DualMap experimentu. Dalším krokem (podkapitola 5.1.3) bylo pomocí sledování pohybu očí ověřit, zda respondenti opravdu využívali 3D mapu více než její 2D ekvivalent.

5.1.3. Eye-tracking analýza „DualMap“ experimentu

Pro statistickou analýzu bylo vybráno pět stimulů (Q4–Q8) DualMap experimentu, které byly inspirovány studií (Savage a kol., 2004). V těchto stimulech je terén vyjádřen pomocí barevné hypsometrie (2D mapa) a perspektivního pohledu na mapu s barevnou hypsometrií doplněnou o stínování.

Eye-tracking metriky, mezi které patří například Fixation Length, Fixation Count, Scanpath Length nebo Dwell Time, jsou odvozeny od základních pohybů oka – fixací a sakád (podkapitola 4.2.7). Statistickou analýzou těchto kvantitativních charakteristik je možné popsat taktiku respondenta při řešení úkolu nebo kognitivní zátěž při čtení mapy.

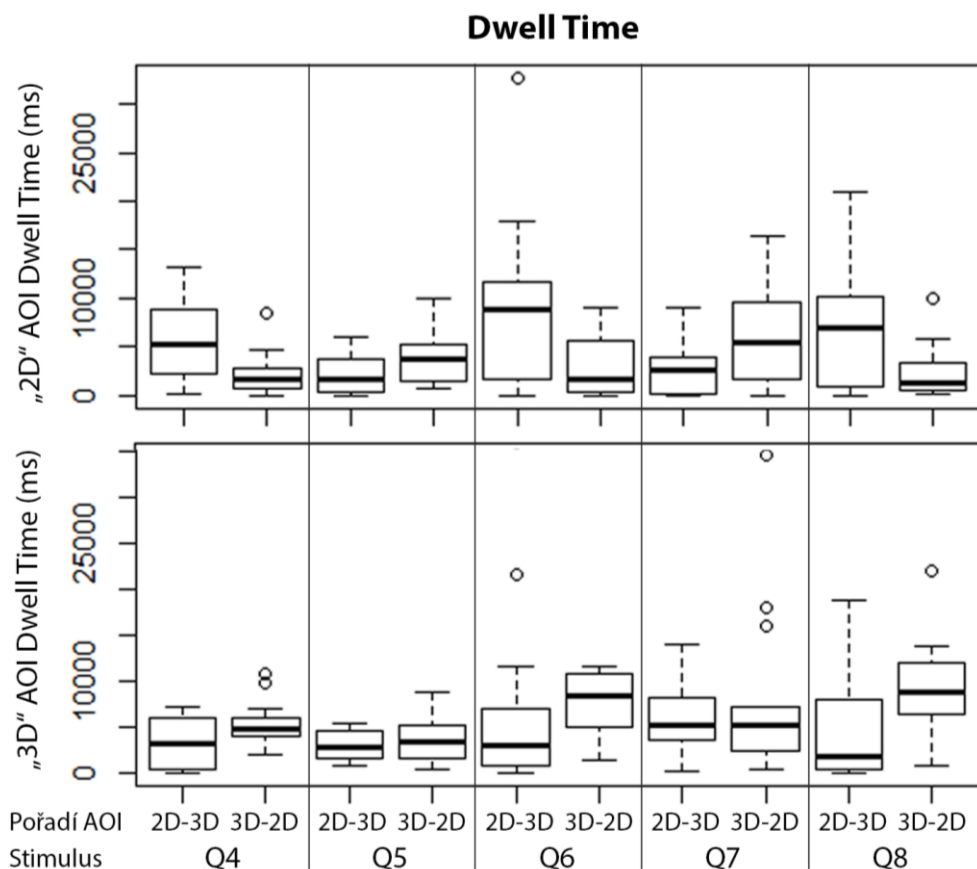
Analýza oblastí zájmu a Dwell Time

Pro analýzy dat naměřených v průběhu DualMap experimentu byla zvolena metrika Dwell Time. V každém stimulu byly vyznačeny oblasti zájmu okolo obou typů vizualizace (2D, 3D). Hodnota metriky Dwell Time představuje součet délky všech fixací zaznamenaných v definované oblasti. Na hladině významnosti $\alpha=0,05$ nebyl nalezen statisticky významný rozdíl v délce Dwell Time pro žádný z pěti studovaných stimulů (tab. 15).

Tab. 15 Výsledky hodnocení rozdílu mezi délkou Dwell Time pro AOI reprezentující 2D a 3D vizualizaci v DualMap experimentu pomocí Wilcoxonova testu

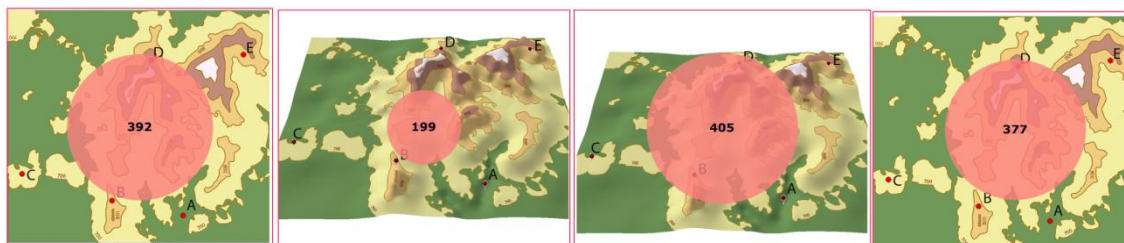
2D vs. 3D AOI	α	W	p-value	výsledek
Q4	0,05	842,0	0,686	H_0 nelze zamítnout
Q5	0,05	943,5	0,167	H_0 nelze zamítnout
Q6	0,05	748,5	0,620	H_0 nelze zamítnout
Q7	0,05	772,0	0,788	H_0 nelze zamítnout
Q8	0,05	740,5	0,567	H_0 nelze zamítnout

Dalším krokem bylo ověření, zda není hodnota Dwell Time ovlivněna pořadím map (2D, 3D) ve stimulu. Boxplot na obrázku 37 ukazuje hodnoty Dwell Time pro oblasti zájmu reprezentující 2D a 3D mapu v jednotlivých stimulech. Pořadí map je znázorněno pomocí označení „2D-3D“ a „3D-2D“. Hodnota Dwell Time pro AOI v levé části stimulu byla vyšší, tedy mapa v levé části stimulu byla preferována. Důvodem byl pravděpodobně fakt, že respondenti jsou zvyklí číst text zleva doprava.



Obr. 37 Hodnoty Dwell Time pro oblasti zájmu reprezentující 2D a 3D mapu ve stimulech Q4-Q8 DualMap experimentu.

Tato situace je ilustrována na příkladu dvojice stimulů Q4. Ve vyznačených oblastech zájmu jsou zobrazeny počty zaznamenaných fixací. V AOI na levé straně je vyšší počet fixací (obr. 38).



Obr. 38 Porovnání počtu zaznamenaných fixací na dvojici stimulů Q4 DualMap experimentu. V levé části stimulu byl zaznamenan vyšší počet fixací bez ohledu na to, jaký typ mapy je zde vyobrazen.

Rozdíly mezi hodnotami Dwell Time na základě pořadí map ve stimulu bylo testováno Wilcoxonovým testem. Byl zjištěn statisticky významný rozdíl v polovině pozorování. Pořadí map ve stimulu ovlivnilo hodnotu Dwell Time v případě stimulů 4, 6 a 8.

Výsledky Wilcoxonova testu pro hodnotu Dwell Time pro AOI reprezentující 2D mapu jsou zobrazeny v tabulce 16, pro 3D mapu pak v tabulce 17. Statisticky významné rozdíly pro Dwell Time v AOI reprezentující 2D mapu byly zjištěny u dvou stimulů (Q4 a Q6). V případě oblasti zájmu reprezentující 3D mapu pak u třech stimulů (Q4, Q6 a Q8).

Tab. 16 Výsledky hodnocení rozdílu mezi délkou Dwell Time pro AOI reprezentující 2D mapu v DualMap experimentu v závislosti na umístění 2D mapy ve stimulu (vlevo (2D3D) vs. vpravo (3D2D)) pomocí Wilcoxonova testu.

2D AOI: 2D3D vs. 3D2D	α	W	p-value	výsledek
Q4	0,05	157	0,007	Zamítáme H_0
Q5	0,05	57	0,062	H_0 nelze zamítnout
Q6	0,05	144	0,034	Zamítáme H_0
Q7	0,05	66	0,141	H_0 nelze zamítnout
Q8	0,05	138	0,069	H_0 nelze zamítnout

Tab. 17 Výsledky hodnocení rozdílu mezi délkou Dwell Time pro AOI reprezentující 3D mapu v DualMap experimentu v závislosti na umístění 3D mapy ve stimulu (vpravo (2D3D) vs. vpravo (3D2D)) pomocí Wilcoxonova testu.

3D AOI: 2D3D vs. 3D2D	α	W	p-value	výsledek
Q4	0,05	52	0,035	Zamítáme H_0
Q5	0,05	92	0,803	H_0 nelze zamítnout
Q6	0,05	55	0,049	Zamítáme H_0
Q7	0,05	97	0,982	H_0 nelze zamítnout
Q8	0,05	52	0,035	Zamítáme H_0

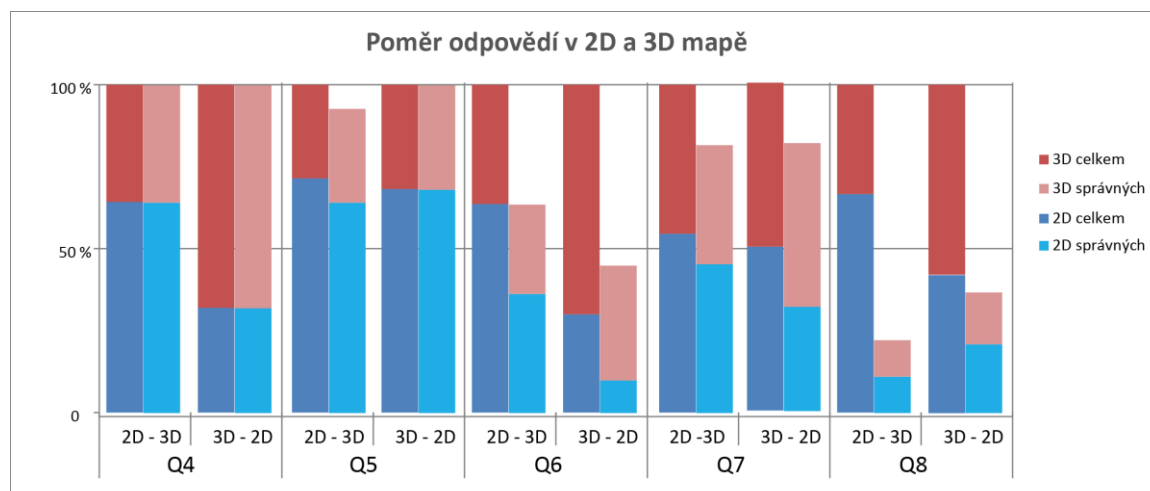
Získané výsledky naznačují, že i přes snahu zamezit vlivu umístění mapy v rámci stimulu (vpravo, vlevo) pomocí vytvoření dvou variant a jejich náhodným výběrem při testování mělo umístění mapy větší vliv na hodnotu Dwell Time než vlastní obsah. Lze tedy říci, že respondenti strávili delší čas pozorováním mapy umístěné v levé části stimulu bez ohledu na to, zda zde byla zobrazena 2D nebo 3D mapa. Z tohoto důvodu byl pro další analýzy využit SingleMap experiment (viz podkapitola 5.1.4).

Správnost odpovědí

V datech naměřených během DualMap experimentu byla rovněž zjišťována správnost odpovědí. Respondenti na zadané otázky odpovídali kliknutím myši přímo do stimulu. Zařízení SMI RED 250 tyto kliky zaznamenává a je možné je následně zobrazit v aplikaci BeGaze nebo vyexportovat jejich souřadnice do textového souboru. U několika respondentů se kliknutí bohužel kvůli chybě softwaru nezaznamenala. Z toho důvodu jsou v grafu na obrázku 39 zobrazeny relativní hodnoty. Graf vyjadřuje poměr odpovědí zaznamenaných v 2D a 3D mapě. Opět je zde patrné, že pořadí map ve stimulu ovlivnilo respondenty více než vlastní typ vizualizace.

U první otázky (Q4) je patrné, že pokud byla 2D mapa v levé části stimulu (2D3D), byl zaznamenán vyšší počet (64 %) odpovědí právě v této mapě. U druhé varianty (3D2D) byla odpověď zaznamenána v 2D mapě pouze u 32 % případů. U druhé otázky (Q5) bylo úkolem respondentů zjistit vzdálenost mezi body. Zde bylo výhodnější použít 2D mapu, což většina

respondentů provedla. V případě varianty 2D3D bylo zaznamenáno kliknutí do 2D mapy u 68 % respondentů, u varianty 3D2D dokonce u 71 % respondentů. Otázky Q6 a Q8 byly zřejmě pro respondenty složité, protože byla zaznamenána vysoká chybovost odpovědí.



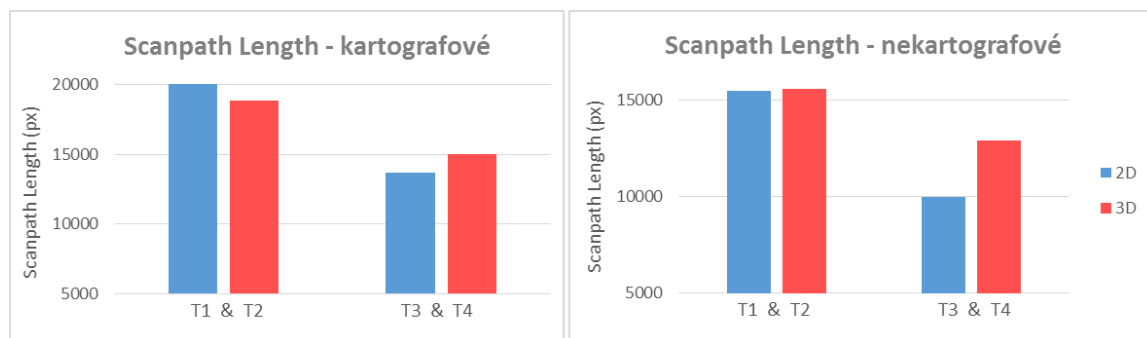
Obr. 39 Poměr odpovědí (kliknutí myši) zaznamenaných v 2D a 3D mapách u otázek Q4 – Q8 DualMap experimentu

5.1.4. Eye-tracking analýza „SingleMap“ experimentu

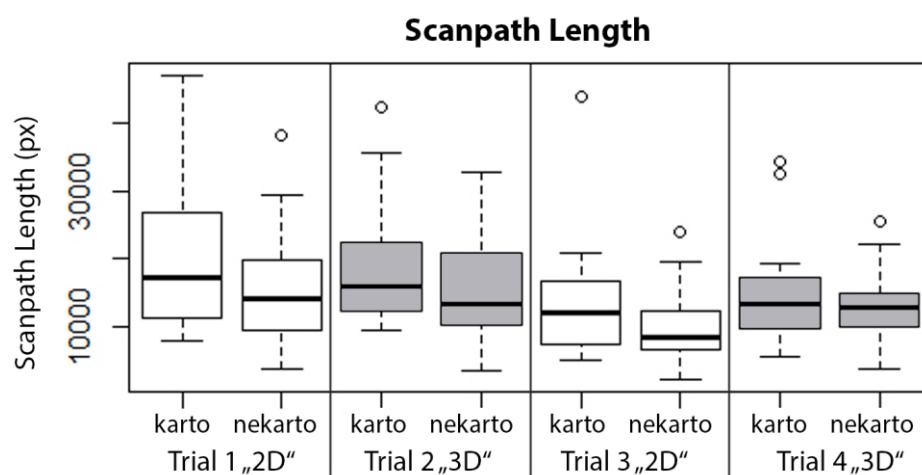
Pro analýzu dat naměřených během SingleMap experimentu byly vybrány dvě dvojice stimulů stejného typu jako stimuly Q4-Q8 popsané v předchozí podkapitole. Jednalo se o stimuly T1, T2, T3 a T4 a zároveň vždy o dvojici map stejného území a stejně položeného úkolu. Pro zamezení efektu učení byla vždy jedna mapa ve dvojici upravena (viz podkapitola 5.1.1). Stimuly T1 a T3 obsahovaly 2D mapu, stimuly T2 a T4 její 3D variantu.

Scanpath Length

V experimentu byla použita metrika Scanpath Length, tedy délka trajektorie oka udávána v pixelech. Vyšší hodnota této metriky indikuje efektivnější vyhledávání (Goldberg a kol., 2002). V kontrastu s tímto tvrzením byla u skupiny kartografů ve všech případech zaznamenána vyšší hodnota Scanpath Length než v případě nekartografů. V zaznamenaných datech však nastala opačná situace (obr. 40).



Obr. 40 Porovnání délky Scanpath mezi kartografy (vlevo) a nekartografy (vpravo) v SingleMap experimentu



Obr. 41 Hodnoty Scanpath Length pro skupiny kartografů a nekartografů ve stimulech T1-T4 SingleMap experimentu. 3D varianta stimulu je označena šedou barvou.

Pro analýzu rozdílů mezi velikostí hodnoty Scanpath Length mezi 2D a 3D mapami byl použit Wilcoxonův test. Statisticky významný rozdíl na hladině významnosti $\alpha=0,05$ byl zaznamenán mezi dvojicí map T3 a T4 v případě nekartografů (viz tabulka 18). Při zanedbání skupin respondentů byl mezi touto dvojicí map rovněž zaznamenán statisticky významný rozdíl.

Tab. 18 Výsledky hodnocení rozdílů mezi délkou Scanpath Length pro dvojice map (T1, T2 a T3, T4) pomocí Wilcoxonova testu

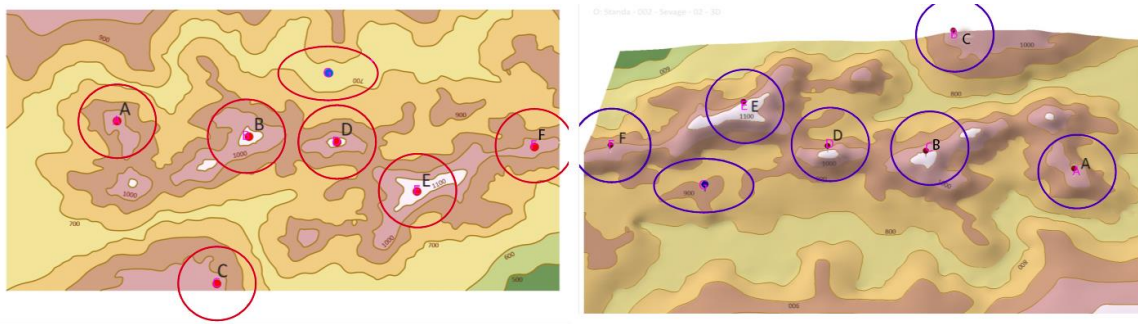
Scanpath Length	α	W	p-value	Výsledek
T1 vs. T2 kartografové	0,05	198	0,968	H_0 nelze zamítnout
T3 vs. T4 kartografové	0,05	168	0,398	H_0 nelze zamítnout
T1 vs. T2 nekartografové	0,05	198	0,968	H_0 nelze zamítnout
T3 vs. T4 nekartografové	0,05	127	0,049	Zamítáme H_0

Scanpath Comparison

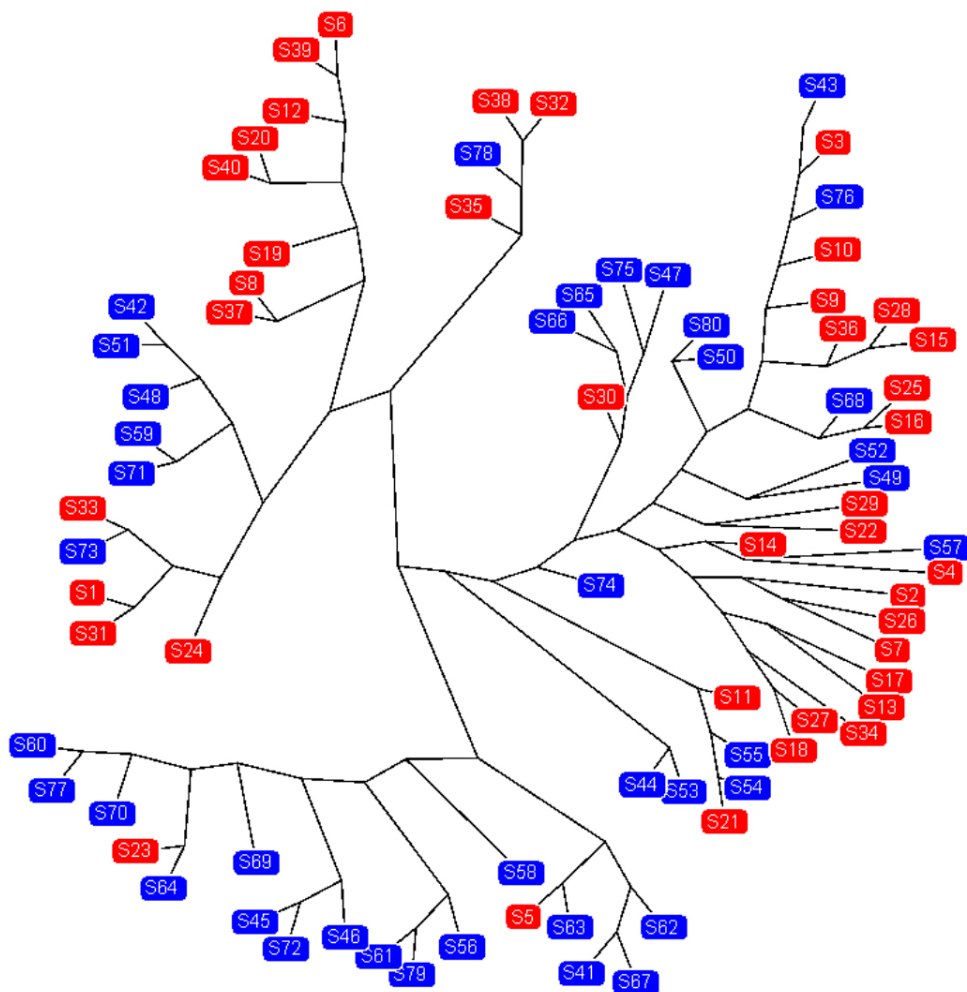
V případě analýzy dalších eye-tracking metrik (Fixation Duration, Fixation Count, Trial Duration) nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly. Skutečnost, že nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl u výše zmíněných metrik, neznamená, že byla kognitivní strategie respondentů v případě 2D a 3D map stejná. Pro porovnání strategie respondentů byla zvolena metoda analýzy eye-tracking dat Scanpath comparison. Využito bylo porovnání String-edit distance (Privitera a Stark, 2000). V tomto případě je pohyb oka nahrazen řetězcem písmen, odpovídajícím označení oblastí zájmu vyznačených nad stimulem, ve kterých byla zaznamenána fixace. Bližší popis této metody je obsažen v podkapitole 4.2.2.

Pomocí String-edit distance byla analyzována data naměřená během SingleMap experimentu pro dvojici stimulů T1 a T2. V každém stimulu byly vyznačeny oblasti zájmu kruhového tvaru okolo bodů v mapě. Oblasti zájmu mají v obou případech stejnou velikost a jejich označení odpovídá označení bodů na obou stimulech, tedy AOI označené jako „A“ je na obou stimulech zakreslena okolo bodu označeného jako „A“.

Pro převod naměřených eye-tracking dat na textové řetězce byla použita aplikace OGAMA a vizualizace podobností mezi jednotlivými řetězci byla provedena formou stromového grafu v aplikaci eyePatterns.



Obr. 42 Oblasti zájmu vyznačené nad dvojicí stimulů T1 (vlevo) a T2 (vpravo) SingleMap experimentu



Obr. 43 Stromový graf obsahující data 40 respondentů naměřená nad dvěma stimuly SingleMap experimentu. Barva každého záznamu odpovídá stimulu, nad kterým byl záznam naměřen. Červená – T1 – 2D mapa; Modrá – T2 – 3D mapa. Číslo u záznamů odpovídá označení respondentů.

Barvy ve stromovém grafu na obrázku 43 odpovídají příslušnosti ke stimulu. Červenou barvou jsou označeny trajektorie, které byly zaznamenány nad stimulem T1 (2D mapa), modrou barvou trajektorie patřící ke stimulu T2 (3D mapa). Z grafu je patrné, že v horní části obrázku je větev obsahující pouze trajektorie zaznamenané nad 2D mapou. Ve spodní

části obrázku je výrazná převaha trajektorií patřících k 3D mapě (16 modrých záznamů a pouze dva červené). Z tohoto výstupu je patrná rozdílná strategie respondentů při čtení 2D a 3D mapy v případě stimulů T1 a T2 SingleMap experimentu.

Závěr experimentů DualMap a SingleMap

Hypotéza, že respondenti budou v dotazníku preferovat 3D mapu se potvrdila u všech tří aspektů – přehlednosti, vhodnosti i estetičnosti. Další hypotézy DualMap experimentu nemohly být potvrzeny ani vyvráceny, protože výsledky DualMap experimentu byly ovlivněny pořadím map ve stimulu více než použitou vizualizací. Proto bylo přistoupeno k tvorbě a analýze SingleMap experimentu.

U SingleMap experimentu bylo oproti hypotéze zjištěno, že ve všech případech byla u kartografů zaznamenána delší trajektorie pohybu oka (Scanpath Length) než u nekartografů (obr. 41). Tento fakt je možné interpretovat tak, že kartografové mají s používáním map větší zkušenost, a proto si je prohlížejí důkladněji. Rovněž byl zjištěn statisticky významný rozdíl v délce Scanpath mezi 2D a 3D mapou T3 a T4. Vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě 3D mapy. Pomocí metody analýzy dat Scanpath Comparison bylo zjištěno, že přestože nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl u dalších eye-tracking metrik, je strategie uživatelů při čtení 2D a 3D mapy rozdílná (obr. 43).

5.2. Hodnocení použitelnosti stínování v mapách

Stínování v kartografii je možné rozdělit do tří kategorií – stínování svahů (slope shading), šikmé stínování (oblique shading nebo hillshading) a kombinované stínování, které kombinuje efekt obou předchozích.

Při použití stínování se definuje úhel osvětlení terénu. Nejčastěji se využívá tzv. konvenční osvětlení, kdy světlo přichází z levého horního rohu mapy (tj. na mapách severní polokoule ze severozápadu) (Bernabé-Poveda a kol., 2011). Přestože tato situace reálně nemůže nastat, právě toto osvětlení je z fyziologického hlediska pro vnímání plasticity nejúčinnější. Imhof (2007) uvádí, že je to způsobeno tím, že lidé píšou zprava doleva, proto je na levé straně ruky držíci pero světlo, kdežto pravá strana je ve stínu. Osvětlení z levého horního rohu se využívalo již na starých mapách při kreslení skal a rozšířilo se v 16. a 17. století jako součást šrafování a kopečkové metody.

Existuje několik důvodů, proč by bylo vhodnější využívat osvětlení z jihu. Mezi nejčastější argumenty patří například vyšší hustota zalidnění na jižních svazích. Tato sídla by na mapě osvětlené z jihu byla lépe viditelná. Nicméně velmi důležitým faktem je to, že většina uživatelů je zvyklá na osvětlení ze severozápadu, a proto by mapu osvětlenou z jihu vnímali jako negativ (Imhof, 2007).

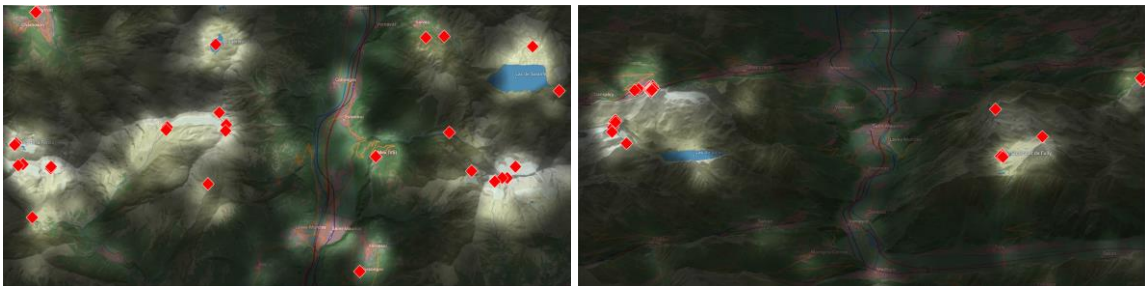
5.2.1. Vliv stínování z jihovýchodu na percepci map

Stimuly T11 a T12 ze SingleMap experimentu popsaného podkapitole 5.1.1 obsahovaly dvojici map z Digitálního atlasu Švýcarska (Sieber a Hurni, 2014). Tato dvojice byla použita pro ověření hypotézy:

- H1: Nalezení nejvyššího území bude pro respondenty problematické na mapě osvětlené z pravého dolního rohu

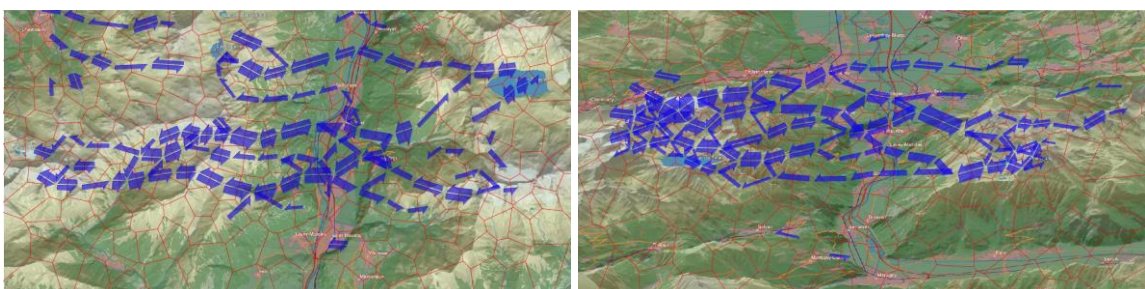
Stimulus T12 obsahuje perspektivní 3D mapu okolí města Saint-Maurice. Stimulus T11 obsahuje 2D mapu stejného území, která byla otočena o 180°. Díky tomuto otočení je mapa osvětlena z pravého dolního rohu. Úkolem respondentů na obou stimulech bylo nalézt nejvyšší bod území.

Pro vizuální analýzu naměřených eye-tracking dat byla využita metoda FocusMap (kernel 100 px, průhlednost 0-75 %). FocusMap je jednou z metod kategorie Attention maps. Oblasti stimulu, ve kterých byla zaznamenána fixace, jsou průhledné a zbývající část stimulu je překryta poloprůhlednou (nejčastěji černou) plochou. Z obrázku 44 je patrné, že v případě 3D mapy (vpravo) jsou fixace koncentrované do dvou oblastí. V případě 2D mapy (vlevo) respondenti obtížněji rozpoznávali terén, proto jsou fixace zaznamenány téměř po celé ploše stimulu. Červené body v obrázku představují souřadnice kliků myši. U 2D mapy je opět jasně patrné, že respondenti byli osvětlením z pravého dolního rohu zmateni. Respondent označený jako P43 (muž, nekartograf) dokonce zvolil jako nejvyšší bod terénu na stimulu T11 střed jezera.



Obr. 44 Vizualizace naměřených eye-tracking dat metodou FocusMap. Světlá místa odpovídají zaznamenaným fixacím všech 40 respondentů SingleMap experimentu. Na 2D mapě (vlevo) osvětlené z pravého dolního rohu byly fixace zaznamenány v celé ploše stimulu. Na 3D mapě (vpravo) byly fixace zaznamenány pouze ve dvou oblastech.

Stejná dvojice stimulů byla analyzována pomocí metody FlowMap v software V-Analytics. Jak je podrobně popsáno v podkapitole 4.2.5, FlowMap ukazuje výsledky diskrétní prostorové a časoprostorové agregace trajektorií. Vizualizace je tvořena šipkami reprezentujícími pohyb pohledu všech respondentů mezi Thiessen polygony vytvořenými nad testovaným stimulem na základě fixací všech respondentů. Nastavení funkce Generalise trajectories v programu V-Analytics bylo následující: Minimum angle: 0; Minimum duration: 0; Minimum distance: 5; Maximum distance: 25; Radius of point cluster: 50. Ve výsledné vizualizaci (obr. 45) jsou zobrazeny pouze šipky reprezentující více než 15 přesunů pohledu. Z obrázku je patrné, že v případě 3D mapy (vpravo) se pohled respondentů pohyboval mezi dvěma oblastmi. Oproti tomu u 2D varianty (vlevo) respondenti při hledání nejvyššího bodu terénu pohledem kontrolovali více oblastí.



Obr. 45 Vizualizace naměřených eye-tracking dat metodou FlowMap. Šipky reprezentují časoprostorově agregované trajektorie pohledu oka. V levé části obrázku je 2D mapa osvětlená z pravého dolního rohu, v pravé části pak její 3D ekvivalent.

Z výše uvedených zjištění a především z velkého množství nesprávných odpovědí (viz obr. 44) lze konstatovat, že použití osvětlení terénu z pravého dolního rohu mapy není pro znázornění reliéfu vhodné. Respondenti si takto znázorněný terén velmi obtížně představovali.

5.2.2. Design experimentu „Shading – Mapy.cz“

Protože je nejčastěji využíváno konvenční osvětlení z levého horního rohu mapy, je tento typ stínování použit i u turistických map na mapovém portálu Mapy.cz. Cílem případové studie bylo ověřit, zda má stínování v turistických mapách vliv při hledání určitého objektu. Respondenti měli za úkol co nejrychleji v mapě nalézt určitý vrchol nebo obec. Bylo zjišťováno, zda má stínování pozitivní vliv při hledání vrcholů a současně zda negativně ovlivňuje respondenta v případě, že úkolem je nalézt obec. Byly ověřovány následující hypotézy:

- H2: Z hlediska vhodnosti budou respondenti v dotazníku preferovat nestínovanou (2D) mapu
- H3: Z hlediska estetiky budou respondenti v dotazníku preferovat stínovanou (3D) mapu
- H4: Hledání vrcholu bude jednodušší na stínované (3D) variantě mapy
- H5: Hledání obce bude složitější na stínované (3D) variantě mapy

Design experimentu Shading – Mapy.cz byl velmi podobný designu SingleMap experimentu popsaného v podkapitole (5.1.1). Jako stimuly sloužily části turistické mapy z mapového portálu Mapy.cz (Seznam.cz, 2015) (viz DVD příloha 3.1 nebo vázaná příloha 3). V době vzniku této studie nebyly běžnému uživateli stínované mapy k dispozici. Z příspěvku na internetovém fóru (Geocaching.cz, 2015) byl zjištěn postup pro zobrazení stínování. Experiment „Shading-Mapy.cz“ obsahoval celkem 12 stimulů, 6 map se stínováním a 6 map bez stínování. Rovněž poměr otázek zaměřených na hledání vrcholů a obcí byl vyvážený (6 vs. 6). Dvojice stimulů na obrázku 46 zobrazuje stejné území a liší se pouze metodou vizualizace (bez stínování, se stínováním). Jednalo se o (pro respondenty) poměrně neznámé území a málo významné obce a vrcholy.

Experiment byl typu within-subject, takže všichni respondenti viděli všechny stimuly. Díky tomu bylo nutné upravit znění otázky tak, aby bylo zamezeno efektu učení. Respondenti proto na mapách hledali různý bod. V ukázce na obrázku 46 bylo úkolem najít vrcholy Pelousek a Horka. Během výběru stimulů bylo dbáno na stejnou vzdálenost správné odpovědi od středu stimulu. Stříдалo se umístění na pravé a levé straně stimulu a stimuly byly respondentům prezentovány v náhodném pořadí.

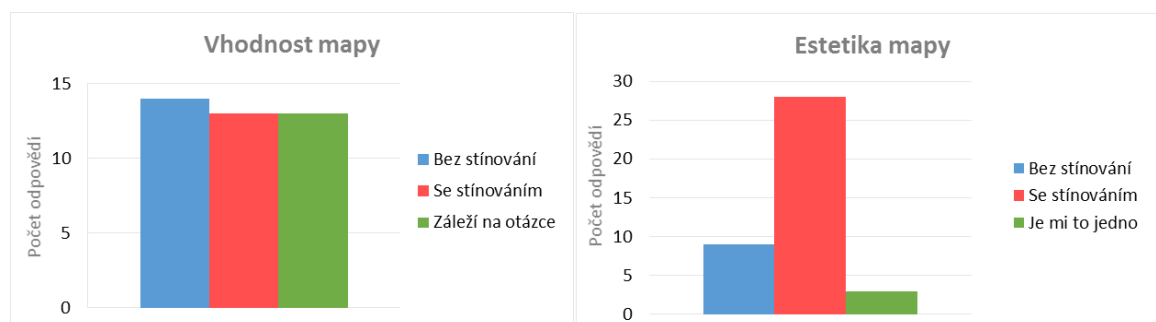


Obr. 46 Dvojice stimulů z experimentu Shading – Mapy.cz. Každý obrázek je samostatný stimulus. Jedná se o mapu stejného území. V levé části je varianta bez stínování, vpravo stínovaná varianta. Správná odpověď je znázorněna červenou šipkou.

Na zapamatování otázky měli respondenti libovolné množství času. Poté byl na 600 ms zobrazen fixační kříž a následně vlastní stimulus. Na nalezení správné odpovědi měli respondenti 45 sekund. Tento čas byl striktně stanoven, aby nedocházelo k neúměrně dlouhému hledání odpovědi. V naprosté většině případů byl tento čas dostačující, k problémům došlo u několika uživatelů pouze u dvojice stimulů 17a a 17b, které obsahovaly velké množství prvků. Experimentu se zúčastnilo celkem 40 respondentů (24 žen a 16 mužů), kartografové i osoby bez kartografického vzdělání.

Kromě eye-tracking dat byl při průběhu experimentu nahráván obraz respondenta a audiozáznam. Ten byl využit k odhalení problémů chybějících dat a k záznamu komentářů respondentů k jednotlivým stimulům.

Po skončení experimentu respondenti zodpověděli dvě krátké otázky. První z nich se týkala vhodnosti mapy pro řešení zadaného úkolu, tedy hledání vrcholu nebo obce. Druhá otázka byla zaměřena na subjektivní názor respondenta na daný typ mapy, tedy zda se mu líbí více varianta bez stínování, se stínováním nebo nemá žádnou preferenci (obr. 47 vlevo). V případě otázky na vhodnost mapy byly odpovědi téměř vyrovnané. Celkem 14 respondentů zvolilo jako vhodnější mapu bez stínování. Shodný počet (13) respondentů zvolil mapu se stínováním a odpověď, že záleží na položené otázce, tedy jestli je úkolem nalezení vrcholu nebo obce. Naprosto rozdílná situace nastala v případě otázky zaměřené na estetiku mapy (obr. 47 vpravo). Většinu respondentů (27) se více líbila mapa se stínováním, pouze devět respondentů zvolilo mapu bez stínování. Zbývající tři respondenti neměli žádnou preferenci.



Obr. 47 Hodnocení vhodnosti a estetiky map zobrazených na stimulech experimentu Shading – Mapy.cz

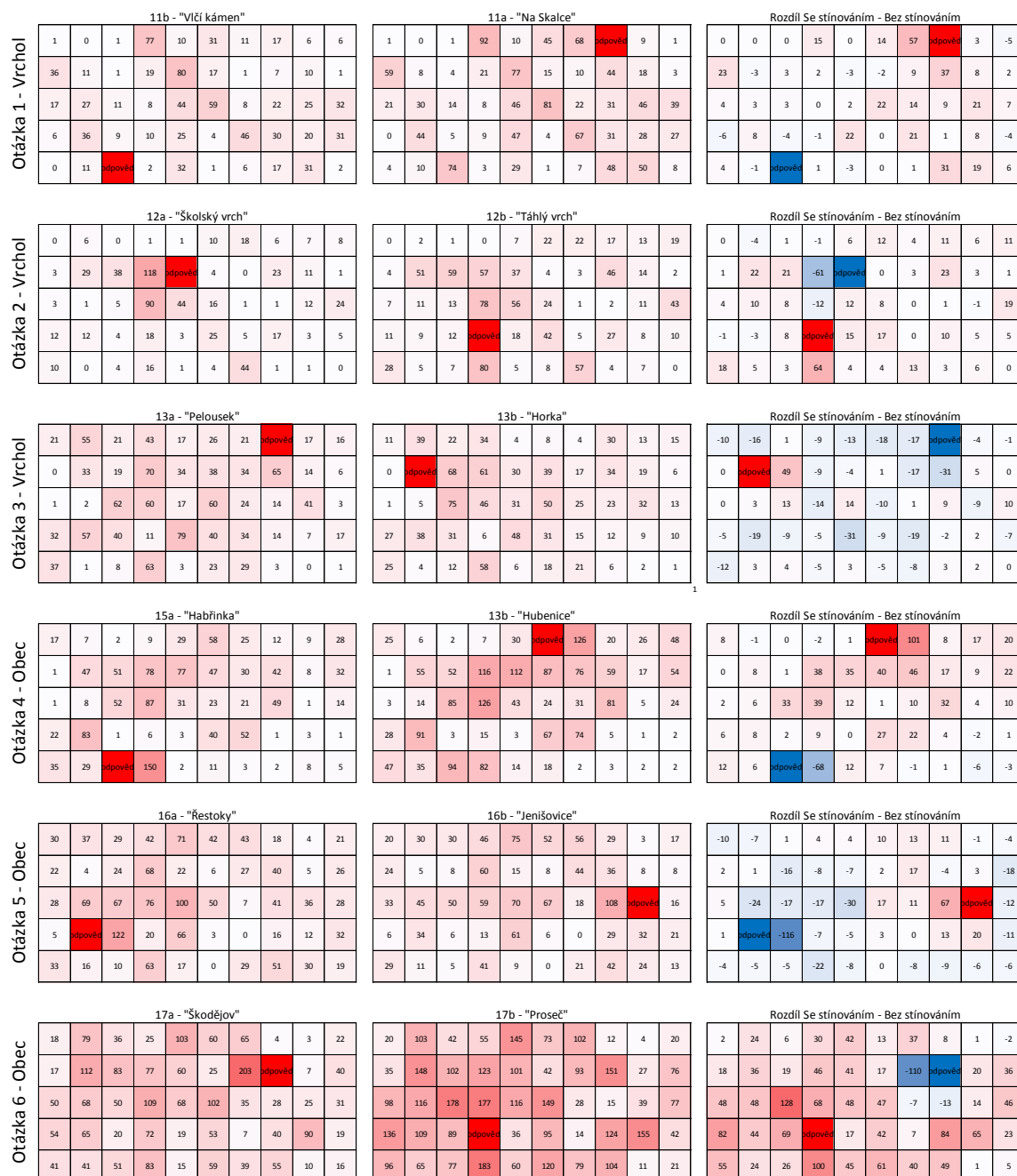
5.2.3. Eye-tracking analýza dat z experimentu „Shading – Mapy.cz“

Při vizualizaci naměřených eye-tracking dat bylo využito postupu, který poprvé představil Brodersen (2002) a později jej upravila Ooms (2014) ve své práci zabývající se porovnáváním percepce map odborníky a laiky. Nad analyzovanými stimuly je vytvořena pravidelná čtvercová mřížka. Odvozené eye-tracking metriky jsou vztaženy k jednotlivým buňkám této mřížky.

Vizualizace Gridded AOI

Pro účely tohoto experimentu byla nad každým stimulem vytvořena mřížka 5x10 buněk. K vytvoření této mřížky byl využit programu COTOS, který vznikl jako výstup z bakalářské práce Kučery (2014). Program COTOS exportuje souřadnice rohů jednotlivých buněk, které byly následně importovány do programu OGAMA, kde byl pro jednotlivé buňky vypočítán počet zde naměřených fixací. Data byla vyexportována ve formě textového dokumentu a vložena do MS Excel, kde byla pomocí funkce Podmíněné formátování obarvena

v závislosti na počtu naměřených fixací. Výhodou tohoto typu vizualizace je možnost s čísly v buňkách dále pracovat. V tomto případě byly od sebe odečteny hodnoty naměřené u varianty se stínováním a bez stínování. Výsledný grid byl opět pomocí funkce Podmíněné formátování obarven. Podle převahy kladných či záporných hodnot bylo určeno, u které varianty bylo naměřeno více fixací, z čehož bylo odvozeno, které části stimulu respondenty zaujaly nebo byly problematické (obr. 48).



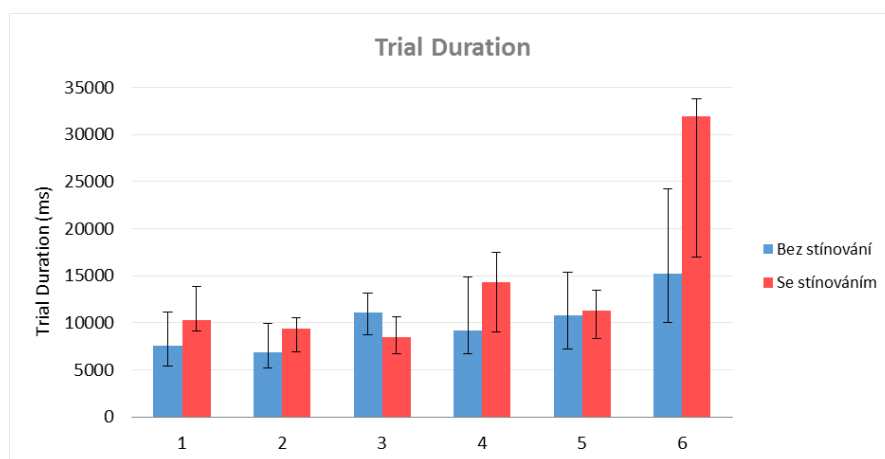
Obr. 48 Počty fixací naměřených v jednotlivých stimulech experimentu Shading – Mapy.cz. V levých tabulkách jsou obsaženy počty fixací naměřených nad stimulem bez stínování. Prostřední tabulky obsahují data ze stimulů se stínováním. V pravých tabulkách je rozdíl obou předchozích gridů vzniklý odečtením stimulu bez stínování od stínované varianty.

Buňka, ve které se vyskytovala správná odpověď, obsahovala nejvyšší počet fixací. Tato extrémní hodnota by ovlivnila vizualizaci pomocí podmíněného formátování, a proto byla nahrazena textem „odpověď“ a tmavě červenou barvou. Z vizuální analýzy na obrázku 48 je

patrné, že největší počet fixací byl zaznamenán u stínované varianty 6. stimulu (17b – „Proseč“). V rozdílných gridech převažují kladné hodnoty (červená barva). Větší počet fixací byl zaznamenán v případě stínované varianty. Výjimkou je pouze 3. a 5. stimulus, kde převažují záporné hodnoty. S těmito zjištěními korespondují i statistické analýzy popsané v další části této podkapitoly. V případě 3. stimulu byl zaznamenán vyšší počet fixací u varianty bez stínování. V případě 5. stimulu byly ze statistického srovnání zjištěny vyrovnané hodnoty, v gridu na obrázku 48 však převažují hodnoty naměřené u varianty bez stínování. Tento nesoulad je způsoben nezahrnutím maximálních hodnot počtu fixací (v buňce odpověď) do vizualizace.

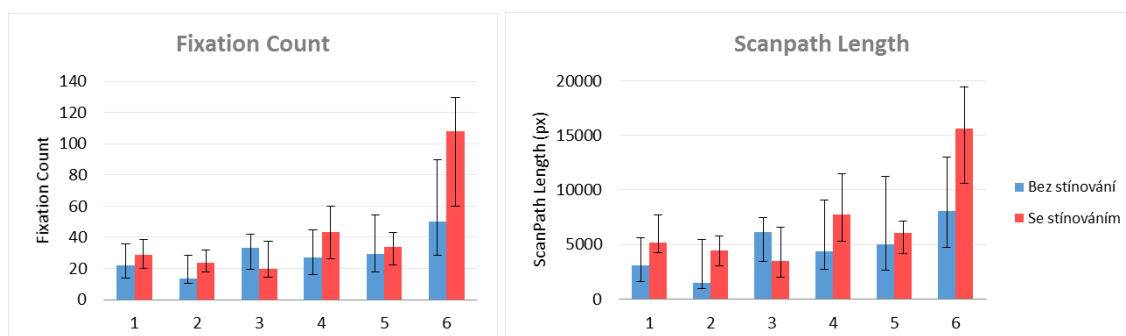
Statistická analýza eye-tracking metrik pro jednotlivé stimuly

Prvním krokem při statistické analýze naměřených dat bylo porovnání délky trvání trialu (Trial Duration), tedy jak dlouho respondenti hledali správnou odpověď. Graf na obrázku 49 znázorňuje mediánové hodnoty této metriky. Je patrné, že ve většině případů (s výjimkou dvojice stimulů č. 3) byla vyšší hodnota zaznamenána u stínované varianty mapy.



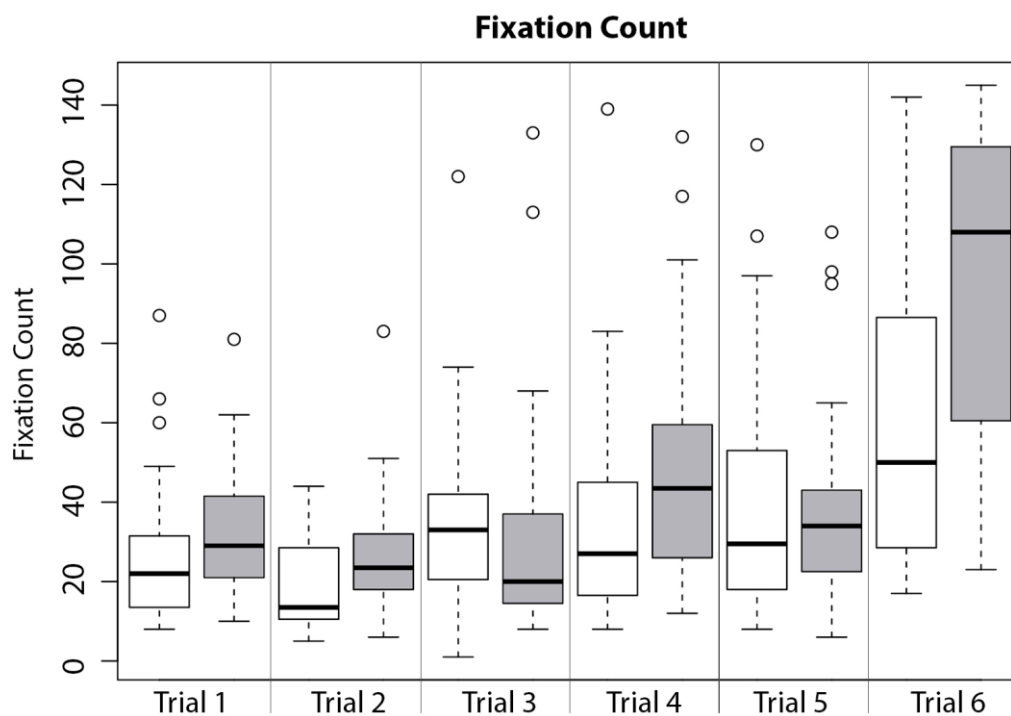
Obr. 49 Porovnání mediánů délky trialu (Trial Duration) mezi stimuly obsahujícími mapy bez stínování (modrá) a se stínováním (červená) v experimentu Shading – Mapy.cz. Chybové úsečky v grafu reprezentují interkvartilové rozpětí.

Dále byly analyzovány eye-tracking metriky Fixation Count (počet fixací) a Scanpath Length (délka trajektorie oka) a Fixation Duration (délka fixací). Téměř ve všech stimulech bylo zaznamenáno více fixací a delší scanpath v případě stínované varianty. Jedinou výjimkou je dvojice stimulů č. 3.



Obr. 50 Porovnání mediánů eye-tracking metrik počet fixací (Fixation Count) a délka trajektorie pohledu oka (Scanpath Length) mezi stimuly obsahujícími mapy bez stínování (modrá) a se stínováním (červená) v experimentu Shading – Mapy.cz. Chybové úsečky v grafech reprezentují interkvartilové rozpětí.

Data byla stejně jako v předchozí kapitole analyzována Wilcoxonovým testem, protože naměřená data nemají normální rozdělení, což bylo zjištěno Shapiro-Wilcoxonovým testem. Nejprve byl rozdíl mezi mapou se stínováním a bez stínování testován pro jednotlivé stimuly. Téměř ve všech případech byly vyšší hodnoty eye-tracking metrik zaznamenané v případě varianty se stínováním (Obrázky 49 a 50). Jedinou výjimkou byl opět stimulus č. 3 (Obr. 51).



Obr. 51 Hodnoty Fixation Count pro všech šest dvojic stimulů v experimentu Shading – Mapy.cz. Varianta se stínováním je označena pomocí šedé barvy.

Souhrn výsledků Wilcoxonova testu je zobrazen v tabulce 19. Statisticky významné rozdíly byly zjištěny téměř u všech stimulů u metrik Trial Duration, Fixation Count a Scanpath Length. V případě délky fixace (Fixation Duration) byl statisticky významný rozdíl zjištěn pouze v případě dvojice stimulů č. 2. Data byla analyzována pomocí Wilcoxonova testu pro každý stimulus zvlášť.

Tab. 19 Výsledky hodnocení rozdílu mezi variantou mapy se stínováním a bez stínování pro čtyři sledované eye-tracking metriky

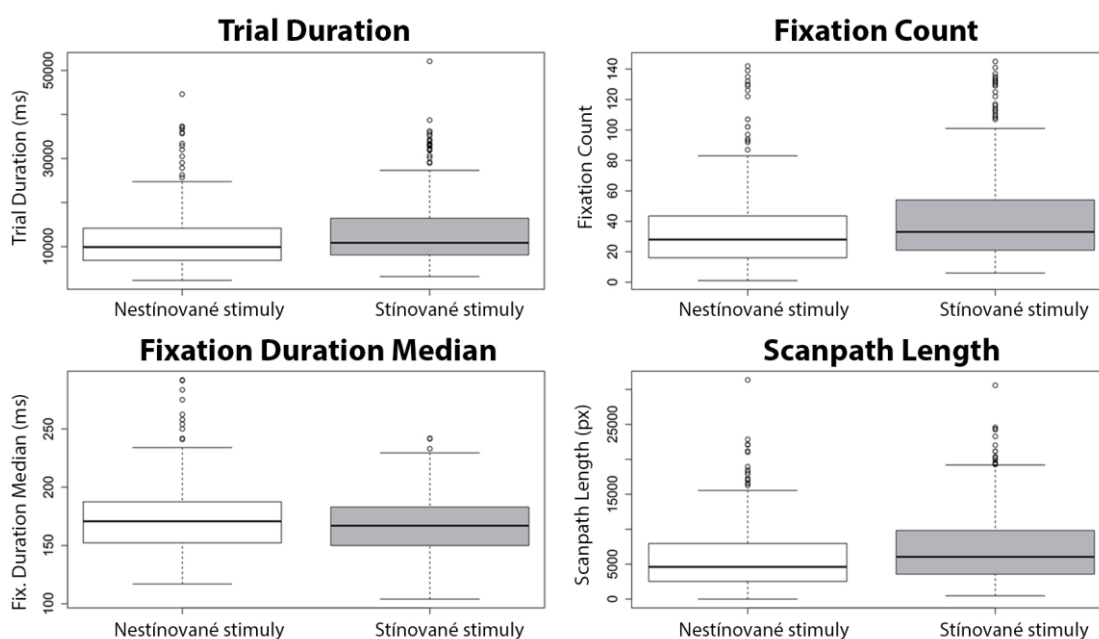
	Trial Duration	Fixation Count	Fixation Duration	Scanpath Length
Trial 1	0,069	0,058	0,650	0,014
Trial 2	0,039	0,031	0,004	0,019
Trial 3	0,022	0,028	0,080	0,019
Trial 4	0,029	0,037	0,357	0,024
Trial 5	0,879	0,922	0,330	0,837
Trial 6	<0,001	<0,001	0,078	<0,001

Statistická analýza eye-tracking metrik pro všechny stimuly dohromady

Následně byl rozdíl mezi mapou se stínováním a bez stínování testován jako celek za všechny stimuly. Ve všech případech kromě metriky Fixation Duration byly na hladině významnosti $\alpha=0,05$ zjištěny statisticky významné rozdíly (tab. 20, obr. 52).

Tab. 20 Výsledky hodnocení rozdílu mezi variantou mapy se stínováním a bez stínování pro čtyři sledované eye-tracking metriky

Se stínováním vs. Bez stínování	α	V	p-value	výsledek
Trial Duration	0,05	10735,5	<0,001	Zamítáme H_0
Fixation Count	0,05	10737,0	<0,001	Zamítáme H_0
Fixation Duration	0,05	14324,0	0,1621	H_0 nelze zamítnout
Scanpath Length	0,05	10550,0	<0,001	Zamítáme H_0



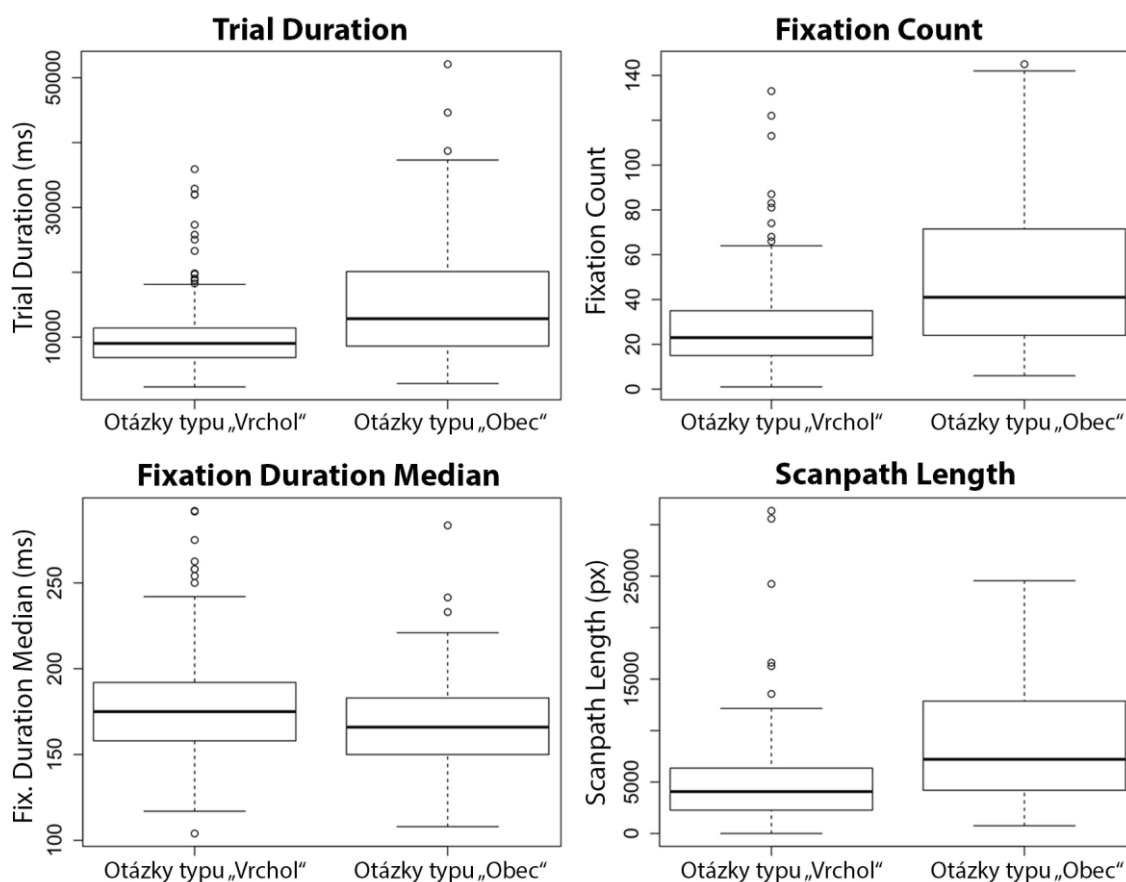
Obr. 52 Hodnoty čtyř eye-tracking metrik souhrnně pro všech šest dvojic stimulů v experimentu Shading – Mapy.cz. Varianta se stínováním je označena pomocí šedé barvy.

Závislost metrik na typu otázky

Na závěr byla testována závislost mezi hodnotou naměřených eye-tracking metrik a typem otázky (zda respondenti v mapě hledali obec či vrchol). Při porovnání otázek zaměřených na hledání vrcholů (trial 1-3) a hledání obcí (trial 4-6) byly nalezeny statisticky významné rozdíly u všech eye-tracking metrik (tab. 21).

Tab. 21 Výsledky hodnocení rozdílu mezi otázkami zaměřenými na hledání vrcholu (trial 1-3) a obce (trial 4-6) v experimentu Shading – Mapy.cz pro čtyři hodnocené eye-tracking metriky

Obec vs. Vrchol	α	V	p-value	výsledek
Trial Duration	0,05	5708,5	<0,001	H_0 nelze zamítnout
Fixation Count	0,05	4954,0	<0,001	H_0 nelze zamítnout
Fixation Duration	0,05	17794,5	<0,001	H_0 nelze zamítnout
Scanpath Length	0,05	5499,0	<0,001	H_0 nelze zamítnout



Obr. 53 Porovnání čtyř eye-tracking metrik pro otázky zaměřené na hledání vrcholu (Trial 1-3) a obce (Trial 4-6) v experimentu Shading-Mapy.cz

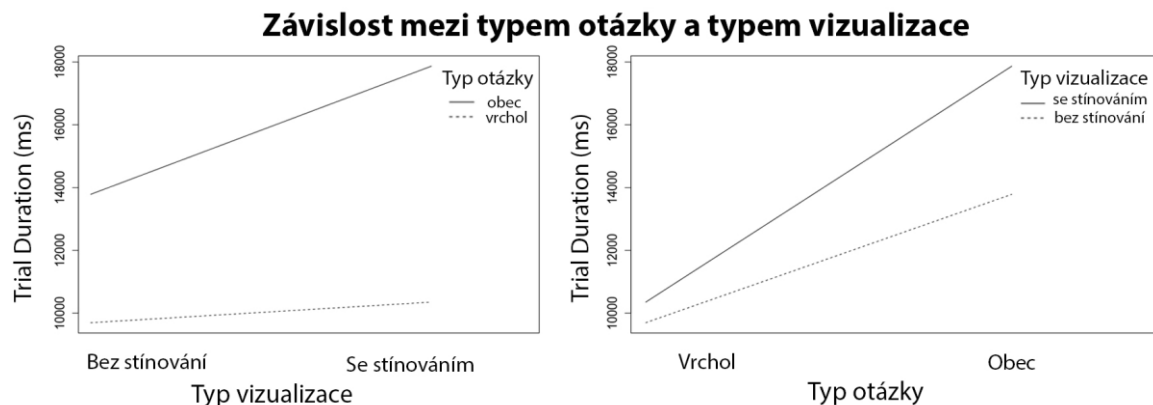
Závislost Trial Duration na typu otázky a typu vizualizace

Závislost mezi typem otázky (obec vs. vrchol) a typem vizualizace (se stínováním vs. bez stínování) byla vyhodnocena pomocí dvoucestné analýzy rozptylu (ANOVA) a vícenásobného párového srovnávání (TukeyHSD). Aby bylo možné tuto analýzu použít, bylo nezbytné ověřit, zda mají rezidua normální rozdělení. To se nepotvrdilo, nicméně výsledky bootstrappingu potvrdily správnost výsledků. Pro hodnocení této závislosti byla zvolena eye-tracking metrika Trial Duration. Bylo zjištěno, že ve všech možných kombinacích byl nalezen statisticky významný rozdíl. Jedinou výjimkou je dvojice otázek zaměřených na hledání vrcholu (se stínováním a bez stínování), kde tento rozdíl nebyl nalezen (tab. 22).

Tab. 22 Porovnání vlivu varianty otázky (obec vs. vrchol) a vizualizace (se stínováním vs. bez stínování) pro eye-tracking metriku Trial Duration. (ANOVA + TukeyHSD)

Dvojice	rozdíl	horních 95 %	dolních 95 %	p-value	výsledek
3D vrchol-2D vrchol	655,1	-1828,6	3138,7	0,905	H ₀ nelze zamítnout
2D obec - 2D vrchol	4088,8	1605,1	6572,4	<0,001	Zamítáme H ₀
3D obec - 2D vrchol	8169,8	5686,2	10653,5	<0,001	Zamítáme H ₀
2D obec - 3D vrchol	3433,7	950,1	5917,4	0,002	Zamítáme H ₀
3D obec - 3D vrchol	7514,8	5031,1	9998,4	<0,001	Zamítáme H ₀
3D obec - 2D obec	4081,1	1597,4	6564,7	<0,001	Zamítáme H ₀

Čas nutný k zodpovězení otázky byl výrazně nižší v případě otázek zaměřených na hledání vrcholu (obr. 54). To bylo zřejmě způsobeno tím, že vrcholů byl v mapách menší počet než obcí. Z grafu lze dále zjistit, že čas nutný k nalezení odpovědi byl v obou případech (obec i vrchol) vyšší při hledání na mapě se stínováním. Větší rozdíl byl však zjištěn při hledání obce. Lze konstatovat, že nejnáročnější bylo pro respondenty hledání obce na stínované mapě. Naopak nejjednodušší (nejrychlejší) bylo hledání vrcholu na mapě bez stínování. Rozdíl mezi délkou hledání vrcholu na stínované mapě a mapě bez stínování není statisticky významný (tab. 22).



Obr. 54 Závislost mezi typem otázky (obec-vrchol) a typem vizualizace (stínovaná - nestínovaná) na turistických mapách v experimentu Shading-Mapy.cz. Pomocí dvoucestné ANOVA a TukeyHSD byla hodnocena eye-tracking metrika Trial Duration.

Závěr experimentu Shading - Mapy.cz

Před vlastním experimentem byla na příkladu jedné dvojice stimulů ověřena hypotéza H1, že stínování z pravého dolního rohu mapy (na severní polokouli z jihovýchodu) je pro uživatele matoucí a mnozí vnímají terén jako negativ.

Hypotéza H3, že respondenti budou z estetického hlediska preferovat stínovanou (3D) mapu se potvrdila. V otázce vhodnosti map pro řešení zadaného úkolu (hledání vrcholu či obce) byly odpovědi respondentů vyrovnané (H2 nepotvrzena). Eye-tracking data naměřená během experimentu Shading-Mapy.cz byla vizualizována pomocí metody Gridded AOI.

Analýza eye-tracking dat ukazuje, že statisticky významné rozdíly mezi stínovanou a nestínovanou mapou byly zjištěny v případě tří ze čtyř hodnocených eye-tracking metrik (Trial Duration, Fixation Count, Scanpath Length). Vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě stínované varianty mapy. Dále byl analyzován vliv otázky na hodnotu těchto eye-tracking metrik. Zde byly statisticky významné rozdíly nalezeny pro všechny čtyři sledované eye-tracking metriky, přičemž vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě otázek zaměřených na hledání obce.

Hypotéza H4, že hledání vrcholu bude pro respondenty jednodušší na stínované variantě mapy, se nepotvrdila. Výsledky experimentu dokazují, že stínované mapy jsou pro vyhledávání obce i vrcholu méně vhodné než jejich varianta bez stínování, a to zejména v případě hledání obce.

6. DC 2B - PŘÍPADOVÁ STUDIE - 3D VIZUALIZACE MĚST

Existují dva základní přístupy při 3D vizualizaci měst – fotorealistická a nefotografická (Cartwright a Peterson, 2007). U fotorealistické vizualizace je velmi obtížné doplnit mapu o jakékoliv tematické prvky, protože fasády, střechy a povrchy objektů jsou provedeny ve skutečných podobách a neumožňují umístění znakové symboliky. Oproti tomu nefotorealistické vizualizace disponují prostorem pro zobrazení kartografických znaků při zajištění optimálního poměru mezi přesností, názorností, srozumitelností a estetikou.

Fotorealistická vizualizace měst se stala populární zejména díky rozšíření aplikace Google Earth, která obsahuje automaticky nebo poloautomaticky generované 3D modely velkých měst s fotografickými texturami (povrchy) objektů. Tyto modely jsou většinou generovány ve vysokém detailu ze šikmých snímků a jsou umístěné přímo na ortofotosnímek. Při zobrazování rozlehlejších oblastí je fotorealistické zobrazení velice komplexní a velmi obtížně použitelné. Příkladem fotorealistické vizualizace celého města je 3D model Říma v roce 320 př. n. l. (Guidi a kol., 2007). Jednotlivé budovy byly vymodelovány velmi detailně, přestože pro většinu budov nebyly dostupné zdroje informací o tom, jak tyto stavby vypadaly. Častěji je však možné se setkat s fotorealistickou virtuální rekonstrukcí pouze částí měst nebo jednotlivých staveb (např. (Koutsoudis a kol., 2007; Remondino a kol., 2009)).

Při nefotorealistické vizualizaci se pracuje s geometrickými objekty a scénami, přičemž se snižuje vizuální složitost jednotlivých objektů, využívají se klasické techniky známé z odborných a kartografických ilustrací (Döllner a Buchholz, 2005). Nefotorealistické 3D modely se využívají zejména u územního plánování nebo v turistických informačních systémech (Döllner a kol., 2005). Při vizualizaci rozsáhlých nefotorealistických 3D modelů se často využívá technika zobrazování různých úrovní detailu (LOD – Level of Detail) pro rychlejší načítání modelu (např. (Semmo a kol., 2012)). Kromě vizualizační funkce mohou nefotorealistické modely sloužit jako nástroj pro přístup k popisným informacím o jednotlivých budovách v modelu. Tento přístup využil například Jedlička (2013) při tvorbě 3D modelu města Terezín. Po kliknutí na jednotlivé budovy v modelu se zobrazí podrobné informace popisující účel budovy, kdo v ní bydlel atd.

Moderní internetové mapové portály využívají nefotorealistických 3D modelů v různých úrovních abstrakce k doplnění a informačnímu obohacení digitálních map velkých měst. Nefotorealistická 3D vizualizace je rovněž součástí moderních GPS navigací, kdy jsou ve větších městech zobrazeny 3D modely budov v okolí plánované trasy. V oblasti 3D vizualizace měst se čeká na tzv. „Killer application“, která by umožnila masové rozšíření tohoto typu vizualizace (Bleisch, 2012).

6.1. Fotorealistická vizualizace zaniklé obce

V rámci bakalářské práce Pavly Dědkové (2012), jejímž vedoucím byl autor disertace, vznikl fotorealistický 3D model zaniklé obce Čistá v Karlovarském kraji. Tato obec zanikla v roce 1948 při vzniku vojenského prostoru Prameny. Při její demolici vznikl instruktážní film české armády „Výcvik boje o osadu a v osadě“ (VFFÚ, 1948). Tento snímek posloužil autorce práce jako jeden ze zdrojů informací o vzhledu obce. Společně s dalšími podkladovými informacemi (otisk Stablního katastru, letecký snímek z roku 1947, fotografie z muzeí atd.) posloužil jako základ pro výsledný 3D model obce.

3D model obce Čistá byl vytvořen v aplikaci Google SketchUp 7 a obsahuje více než 200 budov. Povrchy všech vytvořených budov jsou osazeny černobílými texturami. Při porovnání vytvořeného 3D modelu s historickou fotografií lze identifikovat jednotlivé budovy v obci (obr. 55). Na rozdíl od dalších prací na podobné téma (např. (Jelének, 2010; Koucká, 2011)) je výsledný model obce dostupný veřejnosti prostřednictvím aplikace využívající Google Earth API, kde si mohou uživatelé zobrazit celý 3D model v reálných souřadnicích nad aktuálním ortofotosnímkiem, který je součástí Google Earth. Dále lze jako podklad použít Císařský otisk stabilního katastru nebo letecký snímek z roku 1947.

Součástí bakalářské práce Pavly Dědkové bylo vytvoření krátkého eye-tracking experimentu, jehož cílem bylo prozkoumat rozdíly v percepci různých typů vizualizace této zaniklé obce. Bakalářská práce obsahovala pouze základní statistické zhodnocení a jednoduchou vizualizaci zaznamenaných eye-tracking dat. Naměřená data jsou podrobněji analyzována v podkapitole 6.1.2.



Obr. 55 Porovnání historické fotografie (nahore) a vytvořeného 3D modelu obce Čistá (dole) (Autor: P. Dědková)

6.1.1. Design E-T experimentu „Extinct Village“

Eye-tracking experiment vytvořený jako součást bakalářské práce (Dědková, 2012) se skládal ze tří částí. Stimuly v první části experimentu obsahovaly celkové pohledy na obec ve třech variantách – otisk Stabilního katastru z roku 1841, letecký měřický snímek (LMS) z roku 1947 a 3D vizualizace obce zobrazená nad leteckým snímkem z roku 1947 (vázaná příloha 4). Tyto „free-viewing“ stimuly byly zobrazeny na dobu čtyř sekund a respondenti při jejich sledování nemuseli řešit žádný úkol. V druhé části experimentu bylo úkolem respondentů co nejrychleji nalézt určitou budovu v obci. Stimuly v této části obsahovaly otisk Stabilního katastru z roku 1841, letecký měřický snímek (LMS) z roku 1947 a 3D vizualizaci obce zobrazenou nad tímto leteckým snímkem. Stimuly v poslední části experimentu obsahovaly detaily 3D modelu. U těchto stimulů respondenti nemuseli řešit žádný úkol. Všechny stimuly byly respondentům prezentovány v náhodném pořadí a stejně jako v předchozích případech se jednalo o within-subject studii. Experimentu se zúčastnilo celkem 28 respondentů z řad studentů katedry geoinformatiky UP v Olomouci. Autor

disertační práce v následující podkapitole využívá eye-tracking data tohoto eye-tracking experimentu Pavly Dědkové a provádí nad nimi statistickou analýzu a analýzu pomocí oblastí zájmů. Cílem této analýzy bylo ověření následujících hypotéz:

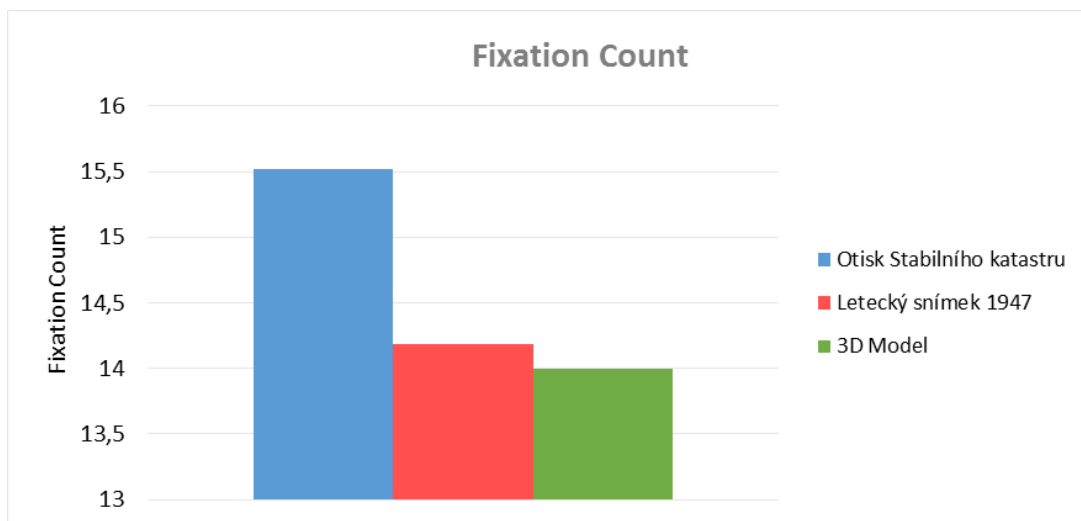
- H1: Nejmenší počet fixací bude zaznamenán u stimulu obsahujícího 3D vizualizaci obce
- H2: Nejvyšší počet fixací bude zaznamenán u stimulu obsahujícího otisk Stablního katastru
- H3: Pro hledání konkrétní budovy v obci bude nejvhodnější 3D vizualizace obce

6.1.2. Eye-tracking analýza dat experimentu „Extinct Village“

U free-viewing stimulů obsahujících celkový pohled na obec byly pro hodnocení zvoleny dvě velmi často používané eye-tracking metriky – Fixation Count a Fixation Duration. Analyzována byla trojice pohledů na obec z jihovýchodu (obr. 56).



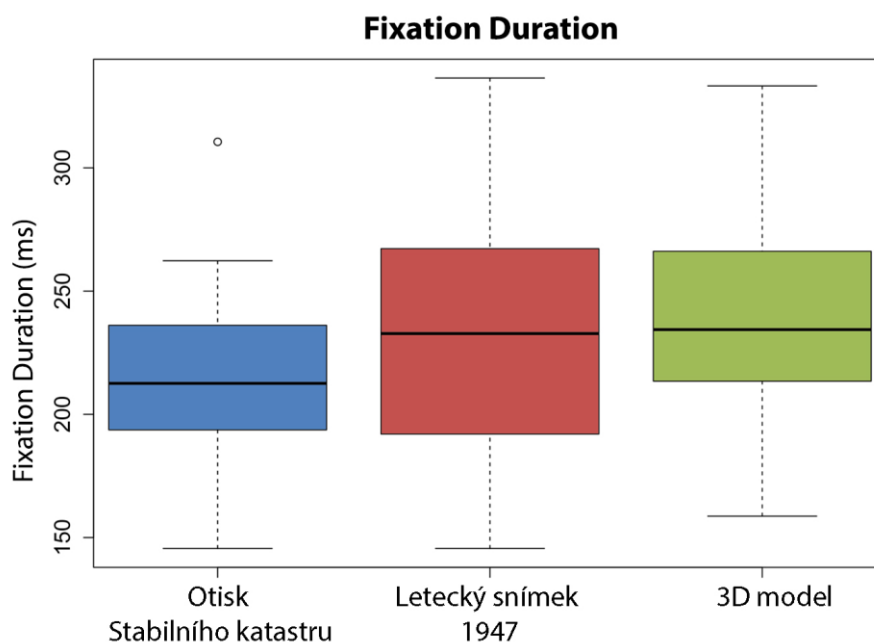
Obr. 56 Trojice stimulů experimentu Extinct Village představující pohled na obec Čistá z jihovýchodu. Zleva otisk Stablního katastru z roku 1841, letecký měřický snímek (LMS) z roku 1947 a 3D vizualizace obce zobrazená nad tímto leteckým snímkem.



Obr. 57 Průměrný počet fixací zaznamenaných u všech 28 respondentů experimentu Extinct Village při sledování tří variant pohledu na obec Čistá z jihovýchodu

Graf na obrázku 57 znázorňuje počet fixací všech 28 respondentů zaznamenaných nad třemi stimuly pohledu na obec z jihovýchodu, přičemž každý sloupec představuje jednu variantu tohoto pohledu – katastrální mapu, letecký snímek a 3D model. Jak je patrné z obrázků 57 a 58, nejvyšší počet fixací s nejkratší délkou byl zaznamenan v případě stimulu reprezentujícího otisk Stablního katastru. Vyšší počet kratších fixací indikuje méně

efektivní vyhledávání (Jacob a Karn, 2003). V dalších dvou variantách stimulu, tedy leteckém snímku z roku 1947 a 3D modelu, jsou hodnoty měřených metrik velmi podobné a výrazně nižší než v případě katastrální mapy, což indikuje hlubší vnímání (Jacob a Karn, 2003).



Obr. 58 Průměrná délka zaznamenaných fixací u všech 28 respondentů experimentu *Extinct Village* při sledování tří variant pohledu na obec Čistá z jihovýchodu.

Data byla statisticky testována s použitím ANOVA a TukeyHSD. Statisticky významný rozdíl pro metriku Fixation Duration byl nalezen mezi stimulem reprezentujícím otisk Stabilního katastru a 3D model zobrazený nad leteckým snímek z roku 1947. Tyto výsledky ukazují, že pohled respondentů na katastrální mapě přecházel z místa na místo. V případě 3D modelu se respondenti více soustředili na jednotlivé prvky (budovy) stimulu.

Tab. 23 Výsledky porovnání vlivu varianty stimulu (otisk Stabilního katastru, Letecký snímek z roku 1947, 3D model) experimentu *Extinct Village* na délku fixace. (ANOVA + TukeyHSD)

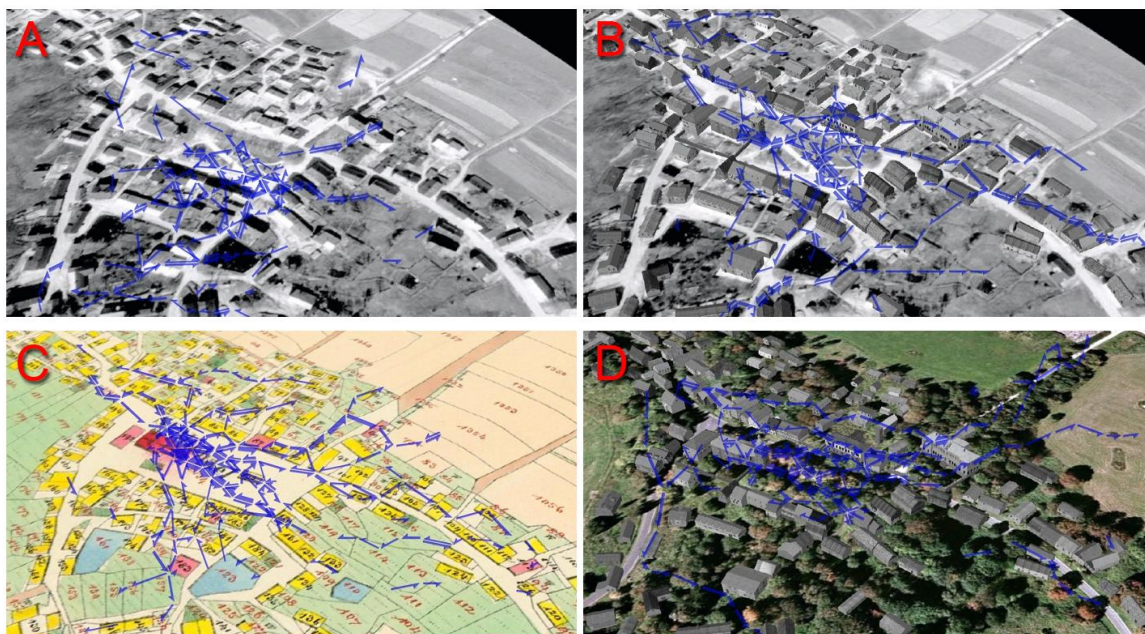
Fixation Duration	rozdíl	dolních 95 %	horních 95 %	p-value
Letecký snímek 1947 – otisk Stabilního katastru	19.499	-6.802	45.800	0.18633
otisk Stabilního katastru – 3D model	28.178	1.876	54.479	0.03283
3D Model – letecký snímek 1947	8.679	-17.622	34.980	0.71181

FlowMap vizualizace

Naměřená data byla stejně jako v podkapitole 5.2.1 vizualizována pomocí metody FlowMap. Ve všech případech bylo použito stejné nastavení a z výsledné vrstvy byly vyfiltrovány pouze šipky, které představují více než tři přesuny pohledu (obr. 59).

Nejvyšší počet šipek (214) zobrazuje FlowMap katastrální mapy (obr. 59-C). Oproti tomu nejmenší počet šipek (164) obsahuje FlowMap leteckého snímku (obr. 59-A). Na FlowMap 3D modelu nad současným ortofotosnímek (obr. 59-D) je 173 šipek, v případě 3D modelu nad leteckým snímek z roku 1947 (obr. 59-B) 204 šipek. U všech variant

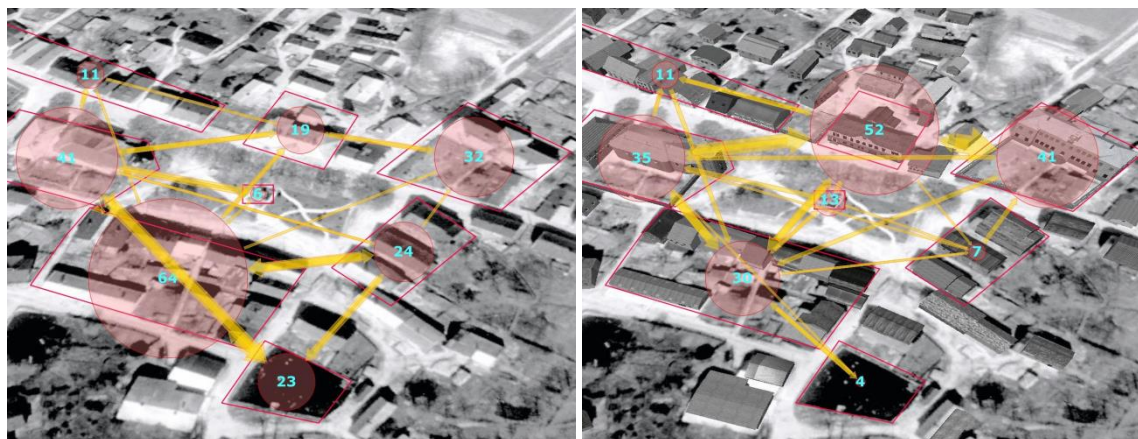
kromě zobrazení historického leteckého snímku je markantní agregovaný směr pohledu respondentů podél sítě ulic v obci.



Obr. 59 Agregovaný směr pohledu respondentů na čtyřech typech stimulů. Vždy bylo použito stejné nastavení metody FlowMap (5;0;5;25;r=25) a vyfiltrovány jsou šípky reprezentující více než tři přesuny pohledu

Analýza oblastí zájmu a Fixation Count

Úkolem ve druhé části experimentu Extinct Village bylo nalezení určité budovy v obci. Analyzována byla dvojice stimulů (letecký snímek z roku 1947 a 3D model zobrazený nad tímto snímkem), na kterých respondenti hledali budovu školy.



Obr. 60 Výsledek analýzy oblastí zájmů na dvou stimulech experimentu Extinct Village. Úkolem respondentů bylo na leteckém snímku z roku 1947 (vlevo) a 3D modelu (vpravo) nalézt budovu školy. Červené kruhy s číslem představují celkový počet fixací zaznamenaných v jednotlivých oblastech zájmu. Žluté šípky reprezentují počet přesunů pohledu mezi oblastmi zájmu.

Pro analýzu dat byla zvolena metoda oblastí zájmu (AOI). Oblasti zájmu byly vyznačeny jako okolí všech vizuálně významných míst na obou stimulech (obr. 60). Červené kruhy s čísly představují počet fixací všech 28 respondentů zaznamenaných v jednotlivých oblastech zájmu. Žluté šípky reprezentují počet přechodů pohledu mezi oblastmi zájmu. Na leteckém snímku (vlevo) byl nejvyšší počet fixací naměřen v oblasti pokrývající blok budov v jižní části obce.

Poměrně vysoký počet fixací (23) byl zaznamenán v okolí rybníka v dolní části stimulu s leteckým snímkem. U stimulu zobrazujícího 3D model obce byly v oblasti rybníka naměřeny pouze čtyři fixace. Nejvíce fixací bylo zaznamenáno v okolí radnice (52) a školy (41). Respondenti tyto dvě budovy považovali za důležité. Z pohledu na stimulus nebylo možné rozpoznat, který z nich představuje školní budovu. Nicméně to, že se respondenti soustředili právě na tyto dvě budovy, ukazuje, že 3D vizualizace byla pro řešení zadaného úkolu vhodnější než zobrazení leteckého snímku. Celkový počet všech fixací naměřených ve stimulu zobrazujícím letecký snímek byl nižší (285) oproti stimulu s 3D modelem (371).

Závěr experimentu Extinct Village

Závěrem analýzy vybraných stimulů experimentu Extinct Village lze konstatovat, že v případě free-viewing stimulů zobrazujících pohled na obec Čistá z jihovýchodu byl nejmenší počet fixací zjištěn u varianty zobrazující fotorealistický 3D model obce (H1 ověřena). Oproti tomu v případě zobrazení otisku Stablního katastru byl zaznamenán vysoký počet fixací, protože respondenti těkali očima z místa na místo (H2 ověřena). Mezi těmito dvěma variantami stimulu byl pomocí ANOVA nalezen statisticky významný rozdíl u eye-tracking metriky Fixation Duration. Data byla rovněž vizualizována pomocí metody FlowMap. Ve druhé části experimentu byly analyzovány výsledky čtení stimulů, kde bylo úkolem respondentů co nejrychleji nalézt budovu školy. Z analýzy oblastí zájmů vyplynulo, že 3D model na podkladě leteckého snímku byl pro tento úkol vhodnější než samotné zobrazení leteckého snímku (H3 ověřena).

6.2. Nefotorealistické 3D mapy měst

Pro hodnocení nefotorealistické vizualizace měst byl vytvořen eye-tracking experiment 3D Cities, jehož cílem bylo zjistit, zda nefotorealistická vizualizace městské zástavby ovlivňuje uživatelskou percepci mapy při hledání konkrétního místa znázorněného bodovým znakem.

6.2.1. Design experimentu „3D Cities“

Pro případovou studii 3D Cities byly využity tři typy nefotorealistické vizualizace měst známé z nejčastěji používaných webových mapových portálů. Screenshots z těchto portálů byly doplněny o bodové znaky, které se v mapách měst běžně nacházejí (kavárna, škola, památka, bankomat atd.).

Vždy byly vytvořeny dvě varianty mapy stejného území (DVD příloha 3.1 a vázaná příloha 5). První variantou byla běžná mapa, na které jsou budovy a bloky budov znázorněny pomocí plošných znaků. U druhé varianty byly budovy a bloky reprezentovány objekty nefotorealistické 3D (2,5D) vizualizace. Cílem experimentu bylo ověření následujících hypotéz:

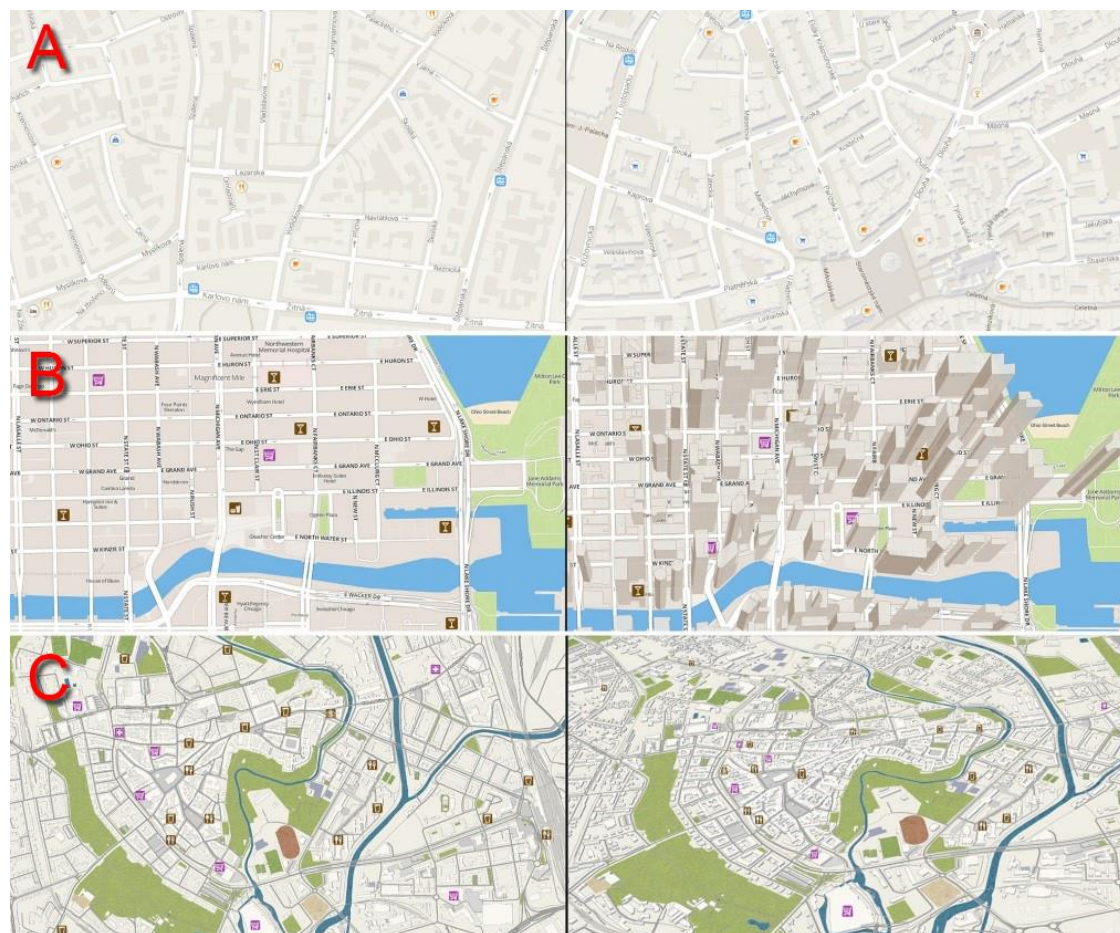
- H1: Z hlediska estetiky budou respondenti v dotazníku preferovat 3D mapu
- H2: Z hlediska vhodnosti budou respondenti v dotazníku preferovat 2D mapu
- H3: Hledání bodového znaku bude nejobtížnější na stimulu č. 9 s nakloněnou mapou
- H4: Hledání bodového znaku bude jednodušší na 2D variantě stimulů bez 3D budov

Ve studii byly využity mapy ze tří zdrojů. Prvním zdrojem byly Google Maps (dvojice stimulů 1-4), které při přiblížení na úroveň zoomu 17 a vyšší vykreslují namísto plošných znaků schematizované 3D modely budov. K vytvoření ekvivalentní 2D varianty byla zvolena

jiná část stejného města, kde není 3D vizualizace dostupná, případně došlo ke spojení několika snímků přiblížených na úroveň zoomu 16 a následnému zmenšení snímku tak, aby pokrýval stejné území jako jeho 3D varianta. Google Maps obsahují nativně velké množství popisků a symbolů, které by znemožnily objektivní porovnání. Z tohoto důvodu byla použita mapa nastýlována pomocí nástroje Gmaps Wizard (Google, 2015). Pro účely experimentu bylo využito sady fiktivních bodových znaků, které byly vytvořeny v souladu s původními Google Maps. Pro každou dvojici map byla využita stejná sada bodových znaků (obr. 61-A).

Dvojice stimulů 5-8 obsahují mapy z OpenStreetMap.org. Ve výchozí verzi OSM nelze 3D budovy zobrazit, nicméně díky otevřenosti tohoto produktu existuje několik možností, jak zobrazit 3D obsah. Nejznámější z nich je projekt OSMBuildings.org využívající technologie LeafletJS a OpenLayers. I u těchto stimulů byla využita fiktivní sada bodových znaků vytvořených v souladu se stylem OpenStreetMap (obr. 61-B).

Poslední dvojice stimulů (9) využívala projektu F4 map, který využívá data OpenStreetMap. V současné době je dostupná pouze nepříliš stabilní betaverze, nicméně v mapě se automaticky zobrazuje 3D varianta celého světa. 3D reprezentace budov je doplněna o zobrazení terénu, animované vodní plochy, dynamické stíny a drobné detaily (stromy, jeřáby atd.). 3D varianta této mapy je zobrazena v šikmém pohledu. Z toho důvodu není v případě 2D a 3D varianty zobrazeno naprosto stejné území (obr. 61-C).



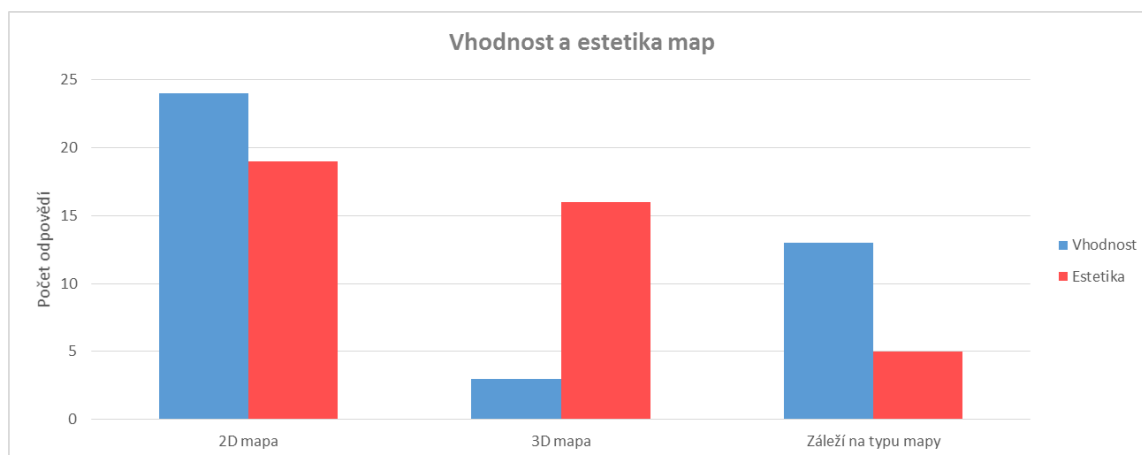
Obr. 61 Dvojice stimulů experimentu 3D Cities. V levé části je zobrazena 2D varianta stimulu, v pravé části 3D varianta. A - Google Maps (zdroj: <http://maps.google.com>), B - OSMBuildings (zdroj: <http://osmbuildings.org>), C - F4 map (zdroj: <http://mapf4-group.com>)

Experimentu 3D Cities se zúčastnilo celkem 40 respondentů (24 žen, 16 mužů). Před vlastním experimentem respondenti vyplnili krátký dotazník. Jedna z otázek byla zaměřena

na četnost využívání internetových mapových portálů jako Google Maps nebo OpenStreetMap. Většina respondentů odpověděla, že se s těmito mapovými portály setkává téměř každý den, a to bez ohledu na to, zda se jednalo o studenta, pracovníka katedry geoinformatiky, nebo respondenta z jiné oblasti s kartografií nesouvisející. Z tohoto důvodu nebyly porovnávány skupiny respondentů mezi sebou (kartograf vs. nekartograf).

Experiment byl stejně jako v předchozích podkapitolách vytvořen jako within-subject, takže všichni respondenti viděli všech 18 stimulů. Pro zamezení efektu učení byli respondenti v rámci dvojice map dotazováni na různě umístěné bodové znaky. Oba stimuly v každé dvojici obsahovaly stejnou sadu znaků, pouze jejich umístění v rámci mapy se lišilo. Stimuly byly zobrazené v náhodném pořadí po dobu 30 sekund. V téměř naprosté většině případů byl tento čas dostatečný.

Po dokončení eye-tracking testování vyplnili respondenti krátký dotazník zaměřený na subjektivní hodnocení použitých map měst z pohledu estetiky a vhodnosti pro řešení zadaného úkolu (nalezení bodového znaku). U obou otázek měli respondenti na výběr ze tří možností – „2D mapa“, „3D mapa“ a „Záleží na typu mapy“ (obr. 62). Respondenti, kteří zvolili poslední možnost, měli rozdílný názor na mapy z Google Maps, OSMbuildings či F4 map.



Obr. 62 Výsledky dotazníku zaměřeného na subjektivní hodnocení vhodnosti a estetiky prezentovaných map měst z experimentu „3D Cities“

Většina respondentů shledala 2D mapu vhodnější pro splnění zadaného úkolu – nalezení bodového znaku. V otázce estetiky byl poměr odpovědí téměř vyrovnán (obr. 62).

6.2.2. Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Cities“

Pro statistickou analýzu naměřených eye-tracking dat bylo využito celkem čtyř eye-tracking metrik – Time to Answer, Fixation Count, Fixation Duration Median a Scanpath Length. Ve všech případech byly využity mediánové hodnoty pro všech 40 respondentů, kteří se testování zúčastnili. Data byla stejně jako v předchozích případových studiích analyzována pomocí Wilcoxonova neparametrického testu a rozdíly mezi 2D a 3D mapami byly ve všech případech hodnoceny na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

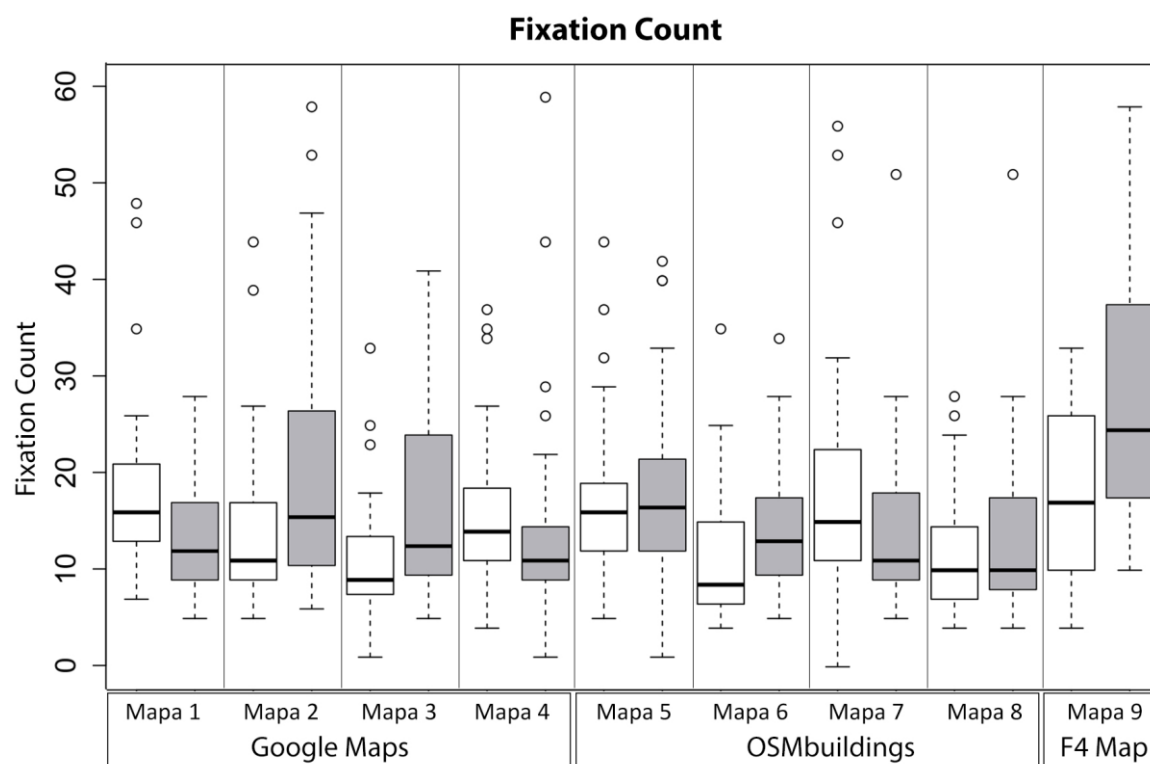
Statistická analýza eye-tracking metrik pro jednotlivé stimuly

Nejprve byly testovány rozdíly mezi jednotlivými dvojicemi stimulů. Výsledky testu ukázaly, že statisticky významné rozdíly u většiny metrik byly zjištěny pro dvojici stimulů číslo 7 a 9 (tab. 24).

Tab. 24 Rozdíl mezi 2D a 3D variantou mapy města experimentu „3D Cities“. Data byla analyzována pomocí Wilcoxonova testu pro každý stimulus zvlášť. Tučně jsou označeny statisticky významné rozdíly.

	Time to Answer	Fixation Count	Fixation Duration	Scanpath Length
Mapa 1	0,009	0,009	0,257	<0,001
Mapa 2	0,048	0,023	0,839	0,081
Mapa 3	0,025	0,004	0,750	0,011
Mapa 4	0,112	0,042	0,488	0,128
Mapa 5	0,365	0,603	0,033	0,656
Mapa 6	0,007	0,008	0,098	0,003
Mapa 7	0,051	0,026	0,044	0,002
Mapa 8	0,192	0,456	0,281	0,476
Mapa 9	<0,001	0,002	0,025	0,018

Nejvyšší podíl statisticky významných rozdílů byl zjištěn u eye-tracking metriky Fixation Count (tab. 24). Největší rozdíl mezi 2D a 3D mapou byl u všech analyzovaných eye-tracking metrik naměřen u dvojice stimulů 9. Vyšší hodnoty metrik byly zaznamenány u 3D mapy, protože ta je v tomto případě skloněná, což negativně ovlivňuje orientaci uživatele. Druhá nejvyšší zaznamenaná hodnota času do kliknutí byla zjištěna u 3D varianty stimulu 5. Tato mapa znázorňovala centrum města New York z portálu OSMbuildings.org a obsahovala velký počet 3D mrakodrapů. Vizuální rozdíl mezi 2D a 3D variantou této mapy byl značný, proto je překvapivé, že rozdíl v času do odpovědi mezi 2D a 3D variantou byl relativně malý (obr. 63).



Obr. 63 Hodnoty Fixation Count pro všech devět dvojic stimulů v experimentu 3D Cities. 3D varianta mapy je označena pomocí šedé barvy.

Z analýzy eye-tracking metrik nelze odvodit, zda byla pro řešení úkolu vhodnější 2D či 3D varianta mapy. Vyšší hodnoty metriky Fixation Count u 2D varianty mapy byly zaznamenány pro mapy číslo 1, 4 a 7 (obr. 63). U zbývajících map byla vyšší hodnota zaznamenána u 3D varianty mapy. Obdobná situace nastala i u ostatních analyzovaných metrik s výjimkou Trial Duration Median. U této metriky však byly statistický významné rozdíly zjištěny pouze ve třech případech.

Statistická analýza eye-tracking metrik pro všechny stimuly dohromady

Dalším krokem při statistické analýze bylo porovnání rozdílů mezi 2D a 3D jako celku za všechny stimuly. Z levé části tabulky 25 je patrné, že při sledování rozdílů mezi 2D a 3D variantami všech stimulů v experimentu 3D Cities byl nalezen statisticky významný rozdíl u metrik Time to Answer a Fixation Duration Median. Vyšší hodnoty obou metrik byly zjištěny pro 3D variantu. Největší rozdíl mezi 2D a 3D variantou u všech sledovaných metrik byl zjištěn u dvojice stimulů z portálu F4 Map. Tyto hodnoty výsledné srovnání velmi ovlivnily. Při nezahrnutí dvojice stimulů č. 9 do statistického srovnání nebyl nalezen statisticky významný rozdíl pro žádnou ze sledovaných eye-tracking metrik (viz pravá část tabulky 25).

Tab. 25 Hodnocení rozdílu mezi 2D a 3D variantou mapy města experimentu 3D Cities pro čtyři sledované eye-tracking metriky. Data byla analyzována pomocí Wilcoxonova testu pro všechny stimuly dohromady. V pravé části jsou zobrazeny výsledky při vynechání dvojice stimulů č. 9.

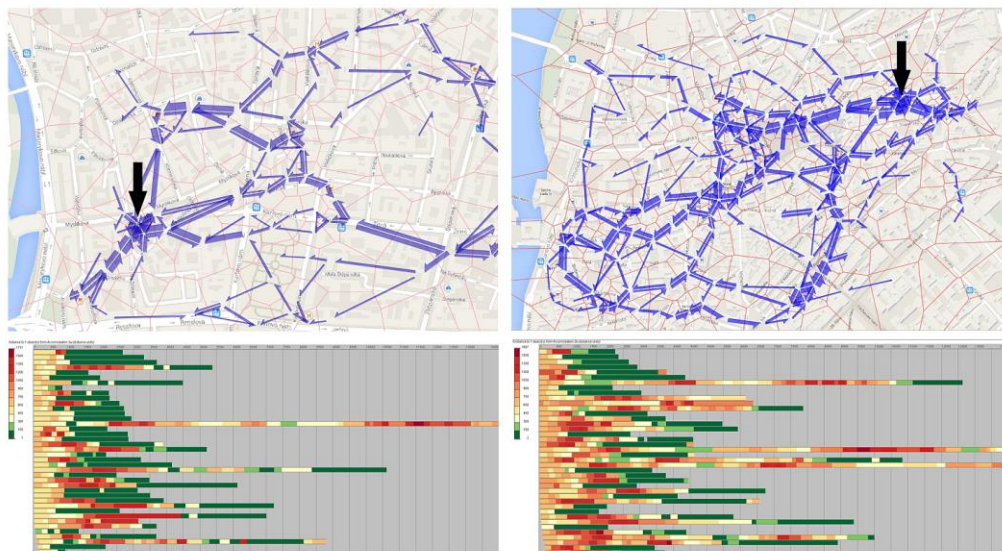


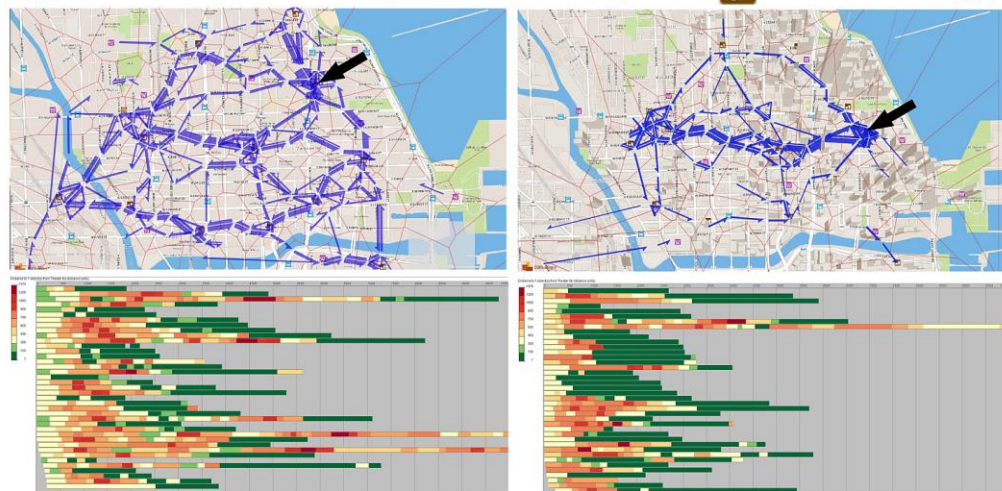
	α	Všechny mapy (dvojice 1-9)		Mapy bez F4 Map (dvojice 1-8)	
		W	p-value	W	p-value
Time to Answer	0,05	58455,0	0,023	48345,0	0,376
Fixation Count	0,05	59532,5	0,059	48965,0	0,339
Fixation Duration	0,05	58952,5	0,036	47549,5	0,118
Scanpath Length	0,05	62603,0	0,431	51254,0	0,982

Vizualizace FlowMap a TimeLine

Kromě statistické analýzy byla naměřená eye-tracking data vizualizována pomocí metod FlowMap a TimeLine dostupných v aplikaci V-Analytics (Andrienko a kol., 2012).

Výstup metody FlowMap znázorňuje trajektorie pohledu mezi vytvořenými Thiessen polygony agregované za všechny respondenty (obr. 64) pro dvojice stimulů 2, 5 a 7. Všechny výstupy byly vytvořeny při použití stejného nastavení v programu V-Analytics. Zobrazené šipky znázorňují celkový počet přesunů pohledu oka mezi jednotlivými Thiessen polygony. Zobrazeny jsou pouze šipky reprezentující tři a více přesunů.

U dvojice stimulů 2 bylo výrazně větší množství přesunů pohledu u 3D mapy. V případě dvojice stimulů 5 je počet agregovaných trajektorií zaznamenaných nad 2D a 3D mapou srovnatelný. V případě poslední zobrazené dvojice stimulů (stimulus 7) bylo větší množství trajektorií pohledu oka zaznamenané v případě 2D mapy. Tyto výsledky odpovídají statistickému zhodnocení popsanému výše.

2DOtázka 2a & 2b - Najděte a označte v mapě „Ubytování“ **3D****2D**Otázka 5a & 5b - Najděte a označte v mapě „Fastfood“ **3D****2D**Otázka 7a & 7b - Najděte a označte v mapě „Divadlo“ **3D**

Obr. 64 Vizualizace naměřených eye-tracking dat pro stimuly 2, 5 a 7 experimentu 3D Cities pomocí metody FlowMap a TimeLine vytvořená v prostředí programu V-Analytics.

Druhou použitou metodou analýzy eye-tracking dat byla metoda TimeLine (obr. 64). Výstup této metody představuje pruhový graf zobrazující data pro jednotlivé respondenty. Na ose X je znázorněn čas a barevnými odstíny jednotlivých segmentů je znázorněna vzdálenost trajektorie oka od zvoleného bodu stimulu. Tím byl v tomto případě hledaný bodový znak. Červená barva představuje nejvyšší vzdálenost pohledu oka od hledaného bodu. Naopak pomocí odstínů zelené barvy je znázorněna situace, kdy vzdálenost pohledu od hledaného znaku nepřesáhla hodnotu 300 px. Pomocí metody TimeLine je možné rychle porovnat dobu, jakou jednotliví respondenti strávili hledáním správné odpovědi. Na obrázku 64 lze porovnat tuto dobu s vizualizací agregovaných trajektorií metodou FlowMap. Je patrné, že výsledky obou metod korespondují. Při detailní analýze výstupu metody TimeLine je zajímavé, že někteří respondenti se několikrát podívali do těsné blízkosti hledaného bodu, přesto si jej nevšimli a pokračovali ve hledání.

Závěr experimentu 3D Cities

Hypotéza, že z hlediska estetiky budou respondenti v krátkém dotazníku vyplňovaném po dokončení eye-tracking experimentu preferovat 3D mapu obsahující vizualizaci budov se nepotvrdila. Respondenti z estetického hlediska neměli jasnou preferenci 2D či 3D varianty map měst. Velká většina z nich však odpověděla, že z hlediska vhodnosti pro splnění zadaného úkolu (hledání bodového znaku) je vhodnější 2D mapa (H2 ověřena).

Z analýzy čtyř eye-tracking metrik pro jednotlivé dvojice zvlášť vyplynulo, že největší rozdíl mezi 2D a 3D variantou mapy byl zjištěn v případě dvojice stimulů 9. Zde byla 3D varianta nakloněna a respondenti se v této vizualizaci obtížněji orientovali (H3 ověřena).

U stimulů 1, 4 a 7 byly vyšší hodnoty sledovaných eye-tracking metrik naměřeny u 2D varianty mapy, u zbývajících dvojic map byla vyšší hodnota zaznamenána u 3D varianty. Výsledky vizuální analýzy pomocí metod FlowMap a TimeLine korespondují s těmito zjištěními. V některých případech byla pro hledání bodového znaku vhodnější 2D mapa, v jiných případech její 3D varianta.

Při statistickém testování rozdílů mezi percepcí 2D a 3D map pro všechny stimuly dohromady bylo zjištěno, že data za stimulus 9 velmi ovlivňují výsledky. Byly zjištěny statisticky významné rozdíly u dvou ze čtyř sledovaných eye-tracking metrik. Tyto rozdíly byly způsobeny extrémními hodnotami zaznamenanými právě v případě stimulu 9. Po vyřazení tohoto stimulu z datasetu bylo provedeno nové testování a statisticky významné rozdíly nebyly nalezeny pro žádnou ze sledovaných eye-tracking metrik.

Závěrem analýzy experimentu 3D Cities lze konstatovat, že jako nevhodné se ukázalo použití 3D varianty stimulu pocházejícího z portálu F4Map. Nalezení hledaného bodu na nakloněné vizualizaci bylo pro respondenty velmi obtížné. U ostatních stimulů byla v některých případech vhodnější 2D mapa, v jiných případech 3D mapa. Při analýze všech stimulů dohromady (kromě dvojice 9) nebylo zjištěno, že by typ vizualizace (2D, 3D) statisticky významně ovlivnil uživatelskou percepci. Hypotéza, že hledání bodového znaku bude jednodušší na 2D variantě stimulu (H4) tedy nebyla potvrzena.

7. DC 2C - PŘÍPADOVÁ STUDIE – TEMATICKÉ 3D MAPY

Využití 3D vizualizace pro znázornění reliéfu (kapitola 5) či městské zástavby (kapitola 6) je v současné době relativně běžné. Jiná situace je u 3D vizualizace tematického obsahu. Přestože existuje řada metod – Stacks of Point Data, Prism Map, Space-Time-Cube, Informational Landscape a další, nejsou tematické 3D mapy příliš rozšířené. Nevýhody (zejména statické) 3D vizualizace (překrývání, perspektivní zkreslení) se u tematických 3D map projeví výrazněji než například při perspektivním zobrazení reliéfu. Tematický obsah je v mapě klíčový, proto je jeho překrytí či deformace velmi nežádoucí. Hlavní výhody 3D vizualizace pro tematickou kartografii spočívají ve zvětšení prostoru, ve kterém jsou data zobrazována (additional display space), a především v možnosti zobrazení většího počtu proměnných (additional data variables) (Shepherd, 2008).

Pro eye-tracking hodnocení tematických 3D map byly vybrány dvě metody tematické kartografie:

- Zobrazení areálových znaků (podkapitola 7.1)
 - Prostorový kartogram (Prism Map)
 - Stínovaný kartogram (Illuminated Choropleth Map)
- Zobrazení bodových znaků (podkapitola 7.2)
 - 3D bodové znaky v mapě a na virtuálním glóbu

7.1. Tematické 3D mapy – metoda areálových znaků

Prostorový kartogram je označován též jako objemový, Prism Map (Jenks a Caspall, 1971), či Stepped Statistical Surface (Kraak a Ormeling, 2011). Při vizualizaci metodou prostorového kartogramu je intenzita jevu vyjádřena nejen pomocí barvy (či rastru), ale zároveň jsou jednotlivé areály vyvýšeny o příslušnou hodnotu kvantitativní charakteristiky znázorněného jevu. Relativní hodnota charakteristiky jevu by měla být primárně vztažena k ploše (tzv. pravý kartogram), i když vnímání plochy zkreslené způsobem konstrukce prostorového kartogramu může činit potíže. Používá se většinou k propagačním účelům (Kaňok, 1999).

Použitelnost 3D kartogramů obecně závisí na řadě faktorů, z nichž pouze některé může kartograf ovlivnit. Mezi nejdůležitější faktory patří geografická složitost zobrazovaného jevu a schopnost uživatele interpretovat obsah výsledné mapy.

Významným faktorem je také definování intervalové stupnice či použití plynulého hodnotového měřítko (unclassified choropleth map, neklasifikovaný kartogram) (Stewart a Kennelly, 2010). Jako první se možností použití neklasifikovaného kartogramu zabýval Tobler (1973), který navrhl použití liniového rastru bez nutnosti klasifikace dat do intervalů. Při klasifikaci zobrazovaných dat do kategorií dochází ke ztrátě informace o přesné hodnotě charakteristiky zobrazovaného jevu. Při použití neklasifikovaného kartogramu (unclassified choropleth map) je pro uživatele velmi obtížné určit hodnotu zobrazovaného jevu. Neklasifikované mapy jsou přesné z hlediska matematického, nikoliv z hlediska percepce (Slocum a kol., 2009).

7.1.1. Design E-T experimentu „3D Thematic – Arealy“

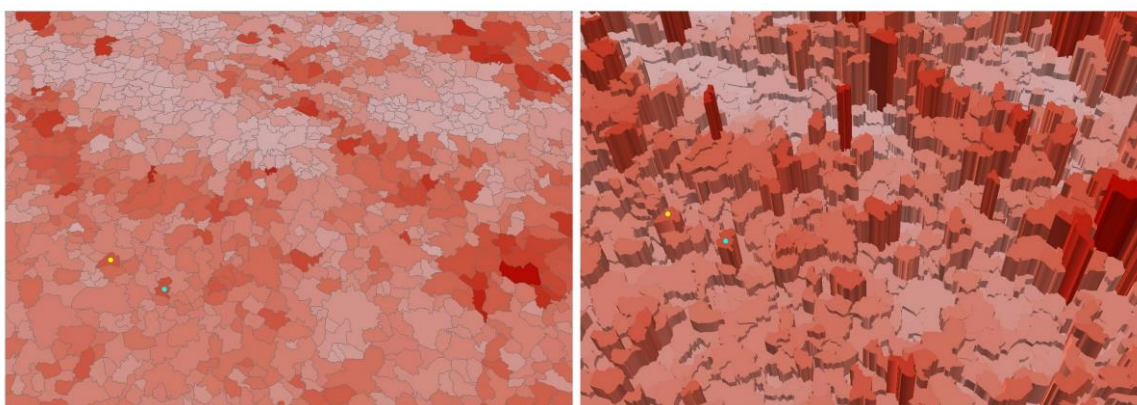
Eye-tracking experiment 3D Thematic – Arealy obsahoval dvě části. V první byl porovnáván jednoduchý kartogram a prostorový kartogram. Ve druhé části byla využita metoda stínování popsaná v předchozí podkapitole a opět porovnána s jednoduchým kartogramem (DVD příloha 5.1 a vázaná příloha 6). Experimentu se zúčastnilo celkem 40 respondentů. Dvacet z nich byli studenti kartografie, zbývajících dvacet byli respondenti, kteří kartografii nestudují a hlouběji se jí nezabývají.

Jednoduchý kartogram vs. prostorový kartogram

Cílem první části experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

- H1: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u prostorového kartogramu
- H2: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u kartografů
- H3: Pro porovnání hodnoty charakteristiky jevu v mapě bude vhodnější prostorový kartogram než jednoduchý kartogram

Pro eye-tracking experiment byla vytvořena sada osmi dvojic stimulů zobrazujících obce České republiky formou jednoduchého a prostorového kartogramu. Úkolem respondentů bylo určit, který ze dvou označených areálů obsahuje vyšší hodnotu podílu lesní plochy na území obce. Při eye-tracking experimentu bylo respondentům řečeno, že se jedná o fiktivní data, aby se nemohli při odpovědi na otázku řídit vlastními zkušenostmi či znalostmi. V kartogramech byla využita barevná stupnice červené barvy. Při rozdělení dat do nízkého počtu intervalů by byl úkol velmi jednoduchý, proto byla barevná stupnice rozdělena do 254 kategorií. Jedná se tedy o téměř neklasifikovaný kartogram. Pro každou dvojici stimulů byly do prostoru stimulu umístěny dva body označující areály, jejichž hodnotu měli respondenti za úkol porovnat. V polovině případů byly body umístěny do sousedních areálů, v polovině případů do areálů od sebe vzdálených. Barevná vzdálenost označených polygonů vypočítaná pomocí metody CIEDE2000 (Brychtova a Coltekin, 2014) byla průměrně $\Delta E_{00}=2,17$. Porovnání pouze na základě rozdílu barvy proto bylo náročné. V každé dvojici stimulů byly označeny stejné areály. Pro zobrazení ve 3D byl využit software ArcScene a nastaven Z-faktor = 1.



Obr. 65 Dvojice stimulů T1-01 experimentu 3D Thematic – Arealy. Na jednoduchém kartogramu (vlevo) a prostorovém kartogramu (vpravo) jsou pomocí bodů označeny areály, jejichž hodnotu měli respondenti za úkol porovnat.

Pro zamezení efektu učení byly stimuly při eye-tracking experimentu zobrazovány v náhodném pořadí a zobrazený výřez kartogramů nebyl díky perspektivnímu zobrazení stejný (obr. 65).

Praktické použití prostorového kartogramu je díky prostorovému zkrácení a především díky překrývání vyvýšených areálů velmi omezené. Jedním ze způsobů řešení těchto problémů je použití interaktivního zobrazování, kdy může respondent s kartogramem manipulovat (otáčet, naklápět, přibližovat se). K tomu však autor nepřistoupil, protože eye-tracking hodnocení interaktivní práce se stimulem by bylo technicky velmi náročné a nekorespondovalo by s dalšími případovými studii disertační práce.

Jednoduchý kartogram vs. stínovaný kartogram

Použitím stínovaného kartogramu je možné odstranit problémy s překrýváním vyvýšených areálů a perspektivním zkrácením. Tento způsob vizualizace byl představen ve studii Stewarta a Kennelyho (2010). Autoři v ní propojili využití klasifikovaného a neklasifikovaného kartogramu a vytvořili mapu hustoty zalidnění USA. Hustota zalidnění byla vyjádřena pomocí pěti barevných kategorií (světle žlutá až tmavě červená) a zároveň pomocí stínování, které bylo vypočítáno na základě neklasifikovaných dat. Díky stínování je možné rozpoznat rozdíly v zalidnění i v rámci jedné barevné kategorie. Pro stínování byla využita aplikace SkyLum (Kennelly a Stewart, 2014). Oproti běžnému stínování (hillshade) je v aplikaci SkyLum možné nastavit různou intenzitu osvětlení z velkého počtu míst. Díky tomu je výsledné stínování přirozenější a je možné je použít pro stínování kartogramu. Součástí studie (Stewart a Kennelly, 2010) bylo uživatelské testování výsledné mapy provedené na vzorku 41 respondentů, kteří řešili čtyři typy prostorových úloh. V uživatelském testování byl porovnáván jednoduchý kartogram obsahující pět barevně odlišených kategorií hustoty zalidnění a stejný kartogram doplněný o stínování vypočtené na základě neklasifikovaných dat. Hypotéza, že použití stínování pomůže respondentům rozlišit velikost hodnoty zalidnění ve dvou sousedících areálech, které spadají do stejné barevné kategorie, byla potvrzena, protože na jednoduchém kartogramu měly oba areály stejnou barvu.

Autor disertační práce autory studie a aplikace SkyLum kontaktoval a aplikaci SkyLum použil pro vytvoření stínovaného kartogramu z dat pro Českou republiku. Použita byla stejná datová sada jako předchozím experimentu. Pro druhou část eye-tracking experimentu 3D Thematic – Areal bylo vytvořeno osm dvojic stimulů porovnávajících jednoduchý kartogram a jeho stínovanou variantu vytvořenou pomocí nástroje SkyLum. Na rozdíl od výše zmíněné studie Kennelyho a Stewarta nebyl o stínování doplněn klasifikovaný kartogram, ale byl využit kartogram neklasifikovaný (stejně jako v předchozí části experimentu).

Úkolem respondentů bylo určit, který z označených areálů znázorňuje vyšší hodnotu charakteristiky zobrazeného jevu. Cílem druhé části experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

- H4: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u stínovaného kartogramu
- H5: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u kartografů
- H6: Pro porovnání hodnoty charakteristiky jevu v mapě bude vhodnější stínovaný kartogram než jednoduchý kartogram

Vytvořeno bylo osm dvojic stimulů zobrazujících jednoduchý kartogram a jeho stínovanou variantu. Kartogramu opět znázorňoval podíl lesní plochy v obcích České republiky. Respondentům bylo řečeno, že se jedná o fiktivní data. Barevná stupnice byla rozdělena do 254 kategorií, jednalo se tedy téměř o neklasifikovaný kartogram. Barevná

vzdálenost mezi označenými areály vypočítaná metodou CIEDE2000 byla průměrně $\Delta E_{00}=1,05$.

Při tvorbě stimulů se stínovaným kartogramem s použitím aplikace SkyLum byl zvolen osvětlovací model Clear Sky, úhel 315° a výška zdroje osvětlení 45° . Počet bodů, ze kterých světlo přicházelo, byl nastaven na 250. Výstup z aplikace SkyLum, textový soubor obsahující úhel, výšku a intenzitu světla pro každý ze zdrojů osvětlení (v tomto případě 250), byl převeden na GRID a poté bylo pomocí Python skriptu aplikováno definované osvětlení.

Pro zamezení efektu učení byly stimuly při eye-tracking experimentu zobrazovány v náhodném pořadí a zobrazený výřez kartogramů byl posunut tak, aby označená dvojice areálů nebyla na stejném místě monitoru (obr. 66).



Obr. 66 Dvojice stimulů Q1 experimentu 3D Thematic – Areal. Na jednoduchém kartogramu (vlevo) a stínovaném kartogramu (vpravo) jsou pomocí bodů označeny areály, jejichž hodnotu respondenti porovnávali.

7.1.2. Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Thematic – Areal“

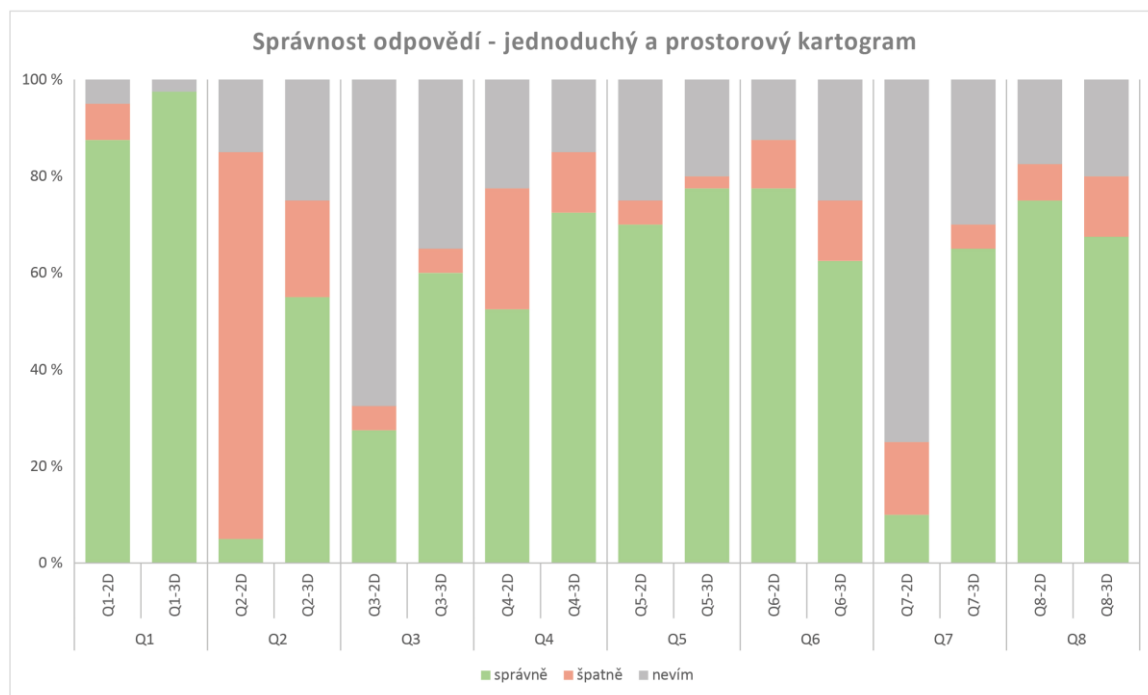
Úkolem respondentů v obou částech experimentu 3D Thematic – Areal bylo určit, který z označených areálů znázorňuje vyšší hodnotu charakteristiky zobrazovaného jevu. Autor analyzoval správnost odpovědí, čas odpovědi a vybrané eye-tracking metriky. Areály byly označené pomocí barevných teček. Respondenti měli na výběr ze tří možností – „žlutá“, „modrá“ a „nevím“. Před testováním byli poučeni, že v žádném z prezentovaných stimulů není hodnota jevu u obou areálů stejná, nicméně v některých případech je barva velmi těžko rozlišitelná (což byl záměr). Dále byli poučeni, že v případě, že si nebudou jisti a museli by se uchýlit k tipování, ať raději zvolí odpověď „nevím“.

Jednoduchý kartogram vs. prostorový kartogram

Prvním krokem při analýze dat naměřených nad stimuly s jednoduchých a prostorovým kartogramem bylo hodnocení správnosti odpovědí. Bylo zjištěno, že nejvyšší chybovost byla u dvojice stimulů Q2, kde byly označené polygony umístěny relativně daleko od sebe. U většiny dvojic stimulů byl vyšší počet správných odpovědí zaznamenán pro prostorový kartogram (obr. 67). Nejmarkantněji se tato skutečnost projevila právě u dvojice stimulů Q2, dále pak u dvojice Q7 a Q3. Výjimku tvořily dvojice stimulů Q6 a Q8, nicméně rozdíl nebyl výrazný.

Hypotézou bylo, že při porovnávání sousedících areálů (Q3, Q5, Q7, Q8) bude výrazně vyšší počet správných odpovědí u prostorového kartogramu. Kromě dvojice Q3 však nebyly rozdíly příliš velké a v případě dvojice Q8 byl větší počet správných odpovědí zaznamenán u jednoduchého kartogramu. Data o správnosti odpovědí byla otestována pomocí testu

dobré shody (χ^2), jehož výsledky ukazují, že statisticky významné rozdíly mezi správnými a špatnými odpověďmi (včetně varianty „nevím“) byly zjištěny u dvojic Q2, Q3 a Q7 (tab. 26).

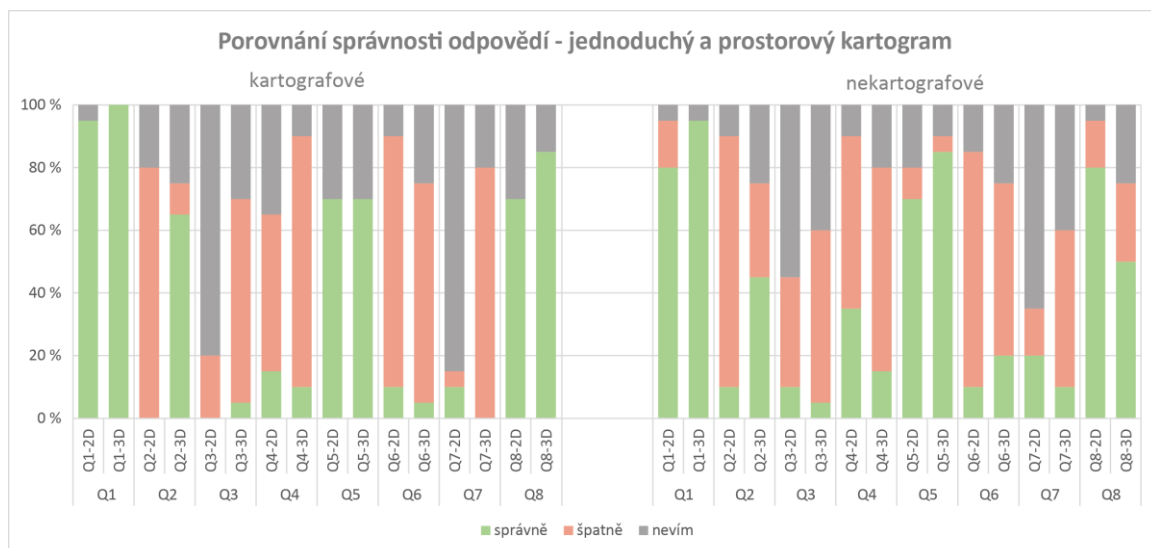


Obr. 67 Odpovědi na dvojice otázek Q1 – Q8 srovnávající jednoduchý (2D) a prostorový (3D) kartogram experimentu 3D Thematic – Areal

Tab. 26 Výsledky testu dobré shody porovnávající počet správných a špatných odpovědí (včetně odpovědi nevím) u otázek nad jednoduchým a prostorovým kartogramem experimentu 3D Thematic – Areal.

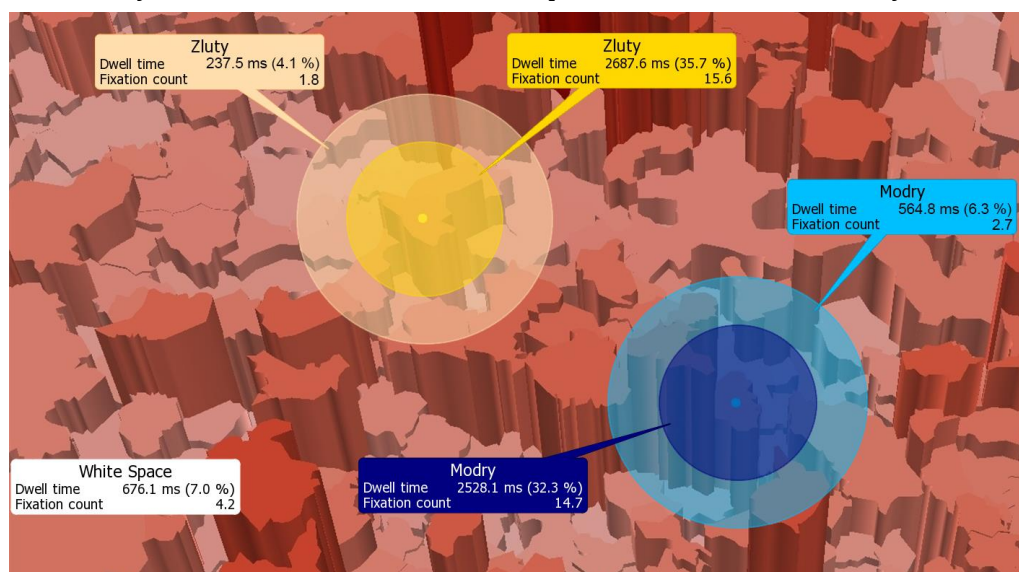
Otázka	χ^2	p-value	výsledek
Q1	1,622	0,203	H_0 nelze zamítnout
Q2	21,488	<0,001	Zamítáme H_0
Q3	7,314	0,007	Zamítáme H_0
Q4	2,613	0,106	H_0 nelze zamítnout
Q5	0,258	0,611	H_0 nelze zamítnout
Q6	1,488	0,223	H_0 nelze zamítnout
Q7	23,520	<0,001	Zamítáme H_0
Q8	0,244	0,621	H_0 nelze zamítnout

Při porovnání odpovědí kartografů a nekartografů (obr. 68) bylo zjištěno, že nekartografové měli u většiny otázek (9 z 16) vyšší počet správných odpovědí než kartografové. Při testování pomocí testu dobré shody bylo zjištěno, že rozdíl byl statisticky významný pouze v jednom případě, a to u prostorového kartogramu stimulu Q8, kde byl vyšší počet správných odpovědí zaznamenán u kartografů (17 oproti 10 u nekartografů).



Obr. 68 Odpovědi kartografů (vlevo) a nekartografů (vpravo) na dvojice otázek Q1 - Q8 srovnávajících jednoduchý a prostorový kartogram experimentu 3D Thematic – Areal

Pro vizualizaci naměřených dat byl využit nástroj Key Performance Indicators programu SMI BeGaze. V okolí označených areálů byly vytvořeny oblasti zájmu. Na obrázku 69 jsou zobrazeny oblasti zájmu na prostorovém kartogramu stimulu Q4. K jednotlivým oblastem zájmu jsou zobrazeny popisné informace obsahující hodnoty Dwell Time a Fixation Count. Metrika Dwell Time udává, kolik času respondenti strávili pohledem v definované oblasti. Z obrázku je patrné, že z přibližně sedmi sekund (průměrná délka Trial Duration u této otázky) strávili respondenti největší část času v bezprostředním okolí označených areálů. Jednalo se o 35,7 % času v případě žlutě označeného areálu a 32,3 % času u modrého areálu. Okolo oblastí zájmu byly vytvořeny obalové zóny, ve kterých respondenti strávili 4,1 % (žlutá) a 6,3 % (modrá) času. Vně vyznačené oblasti se respondenti dívali v průměru pouze 676 ms (7 % času). Nízké hodnoty značí, že se respondenti při určování hodnoty jevu řídili převážně porovnáním barev obou areálů. Pokud by porovnávali výšku areálů, byla by zaznamenána vyšší hodnota Dwell Time vně bezprostředního okolí označených areálů.



Obr. 69 Oblasti zájmu vyznačené na stimulu prostorového kartogramu Q4 eye-tracking experimentu 3D Thematic – Areal. U jednotlivých oblastí zájmu jsou vyznačeny hodnoty Dwell Time a Fixation Count.

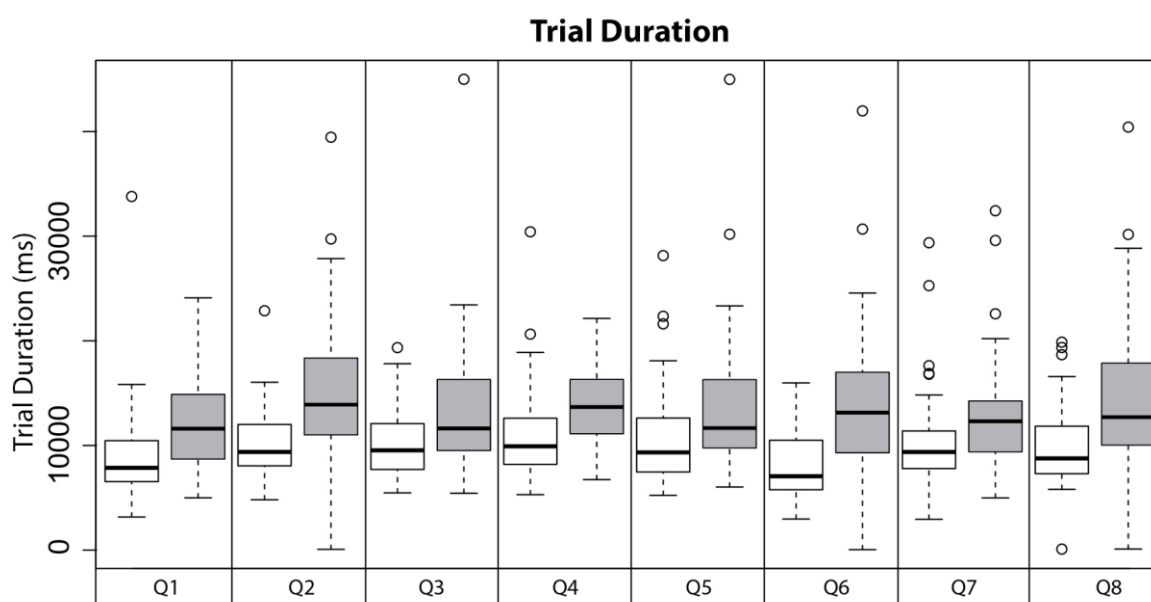
Po analýze správnosti odpovědí bylo analyzováno pět eye-tracking metrik (Trial Duration, Fixation Count, Fixation Frequency, Fixation Duration a Scanpath Length). Nejprve byly pomocí Wilcoxonova testu porovnávány rozdíly mezi 2D a 3D variantou kartogramu u všech stimulů. Statisticky významné rozdíly byly zjištěny u všech testovaných metrik kromě Fixation Duration. Nejvyšší rozdíl byl zjištěn u metriky Fixation Frequency, která udává počet fixací za sekundu.

Tab. 27 Výsledky hodnocení rozdílu mezi jednoduchým (2D) a prostorovým (3D) kartogramem experimentu 3D Thematic – Arealy pro pět hodnocených eye-tracking metrik

2D vs. 3D	α	W	p-value	výsledek
Trial Duration	0,05	45281,5	0,011	Zamítáme H_0
Fixation Count	0,05	44401,5	0,004	Zamítáme H_0
Fixation Frequency	0,05	45050,0	0,009	Zamítáme H_0
Fixation Duration	0,05	51811,5	0,794	H_0 nelze zamítnout
Scanpath Length	0,05	45850,0	0,022	Zamítáme H_0

Je zajímavé, že při analýze jednotlivých dvojic stimulů bylo nalezeno pouze málo statisticky významných rozdílů. U většiny metrik byly tyto rozdíly zjištěny mezi 2D a 3D variantou stimulů Q2 a Q6. U metriky Fixation Count nebyla ani jedna ze zjištěných hodnot statisticky významná. Z boxplotu na obrázku 70 je patrné, že u metriky Trial Duration byla u většiny otázek vyšší hodnota zaznamenána v případě prostorového kartogramu. Ani v tomto případě však hodnoty nebyly statisticky významné. Jedinou výjimkou byla dvojice Q2 (p-value 0,006).

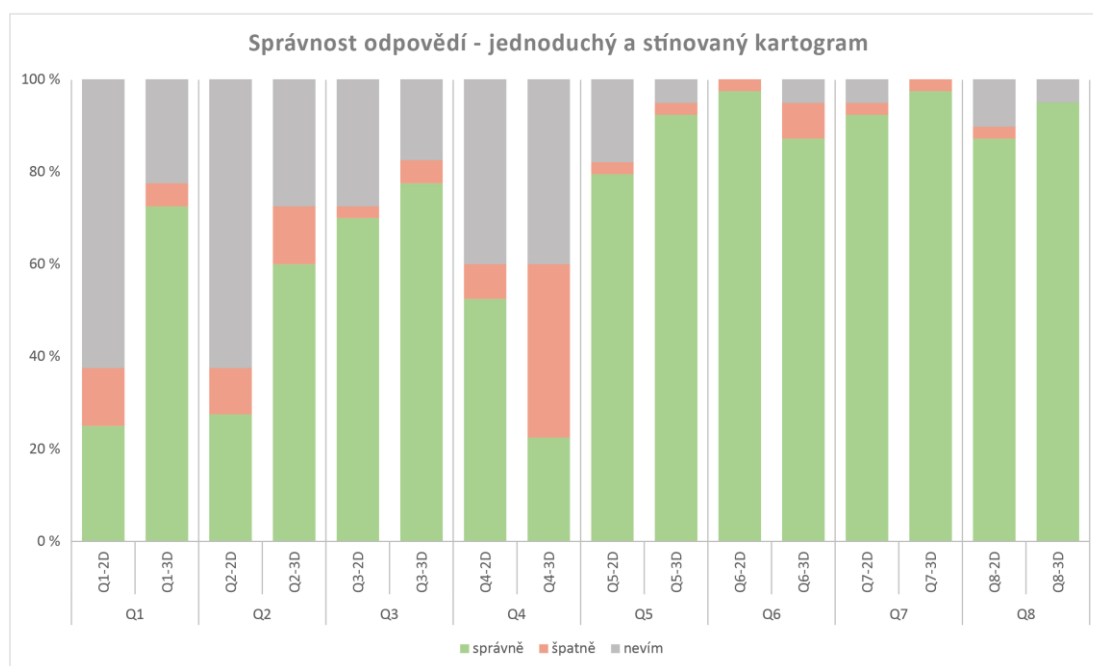
Respondenti během experimentu vybírali areál s vyšší hodnotou charakteristiky jevu rychleji v případě jednoduchého kartogramu (2D), ale vyšší počet správných odpovědí byl u prostorového kartogramu (3D).



Obr. 70 Hodnoty Trial Duration pro dvojice stimulů srovnávajících jednoduchý a prostorový kartogram experimentu 3D Thematic – Arealy. 3D varianta stimulu je označena šedou barvou.

Jednoduchý kartogram vs. stínovaný kartogram

Stejně jako v první části experimentu byla u naměřených dat nejprve hodnocena správnost odpovědí. Průměrná barevná vzdálenost označených areálů byla nižší než v případě porovnání jednoduchého a prostorového kartogramu ($E_{00}=1,05$ oproti $E_{00}=2,17$). Počet správných odpovědí byl ale vyšší než první části experimentu. Správných odpovědí bylo zaznamenáno 448 (z 640 možných). Zajímavé je, že nejvyšší počty správných odpovědí byly u otázek Q5 až Q8, a to i přesto, že otázky byly respondentům prezentovány v náhodném pořadí (obr. 71). Je možné, že tato anomálie byla způsobena nevhodným označením porovnávaných areálů pomocí modrého a žlutého bodu. Barva těchto symbolů mohla respondenty ovlivnit při odhadu hodnoty zobrazovaného jevu. Pokud se tak stalo, je zajímavé, že ke stejnému ovlivnění nedošlo v první části experimentu, kde byly areály označeny stejným způsobem.



Obr. 71 Odpovědi na dvojice otázek Q1 – Q8 srovnávající jednoduchý a stínovaný kartogram experimentu 3D Thematic – Arealy

U většiny otázek byl vyšší počet správných odpovědí zaznamenán u stínovaného kartogramu (3D). Výjimkou byly stimuly Q4 a Q6. Ve většině případů ale nebyl rozdíl mezi 2D a 3D variantou kartogramu statisticky významný. Statisticky významné rozdíly podle testu dobré shody byly zjištěny pouze u dvojic stimulů Q1, Q2 a Q4.

U většiny otázek měli vyšší počet správných odpovědí kartografové (10 z 16), nicméně statistické porovnání neodhalilo statisticky významné rozdíly.

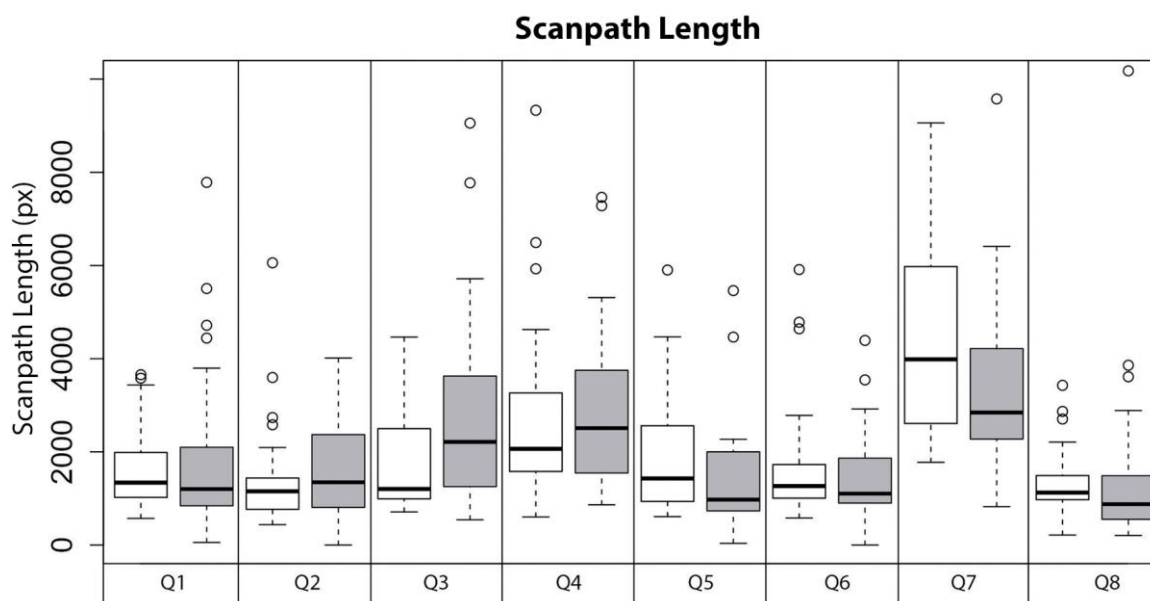
Tab. 28 Výsledky hodnocení rozdílu mezi jednoduchým (2D) a stínovaným (3D) kartogramem experimentu 3D Thematic – Arealy pro pět hodnocených eye-tracking metrik

2D vs. 3D	α	W	p-value	výsledek
Trial Duration	0,05	49515,5	0,471	H_0 nelze zamítnout
Fixation Count	0,05	49339,0	0,426	H_0 nelze zamítnout
Fixation Frequency	0,05	49785,5	0,545	H_0 nelze zamítnout
Fixation Duration	0,05	51424,0	0,924	H_0 nelze zamítnout
Scanpath Length	0,05	52390,5	0,611	H_0 nelze zamítnout

Při statistickém hodnocení rozdílů mezi 2D a 3D variantou stimulu pro pět eye-tracking metrik u všech otázek nebyly zjištěny žádné statisticky významné rozdíly (tab. 28). Při testování každé dvojice otázek zvlášť byly statisticky významné rozdíly u většiny metrik nalezeny pouze u dvojic Q4 (v případě metriky Fixation Count a Fixation Frequency) a Q3 (metrika Fixation Duration) (tab. 29).

Tab. 29 Výsledky hodnocení rozdílů eye-tracking metrik mezi jednoduchým (2D) a stínovaným (3D) kartogramem experimentu 3D Thematic – Arealy pro každou dvojici otázek zvlášť

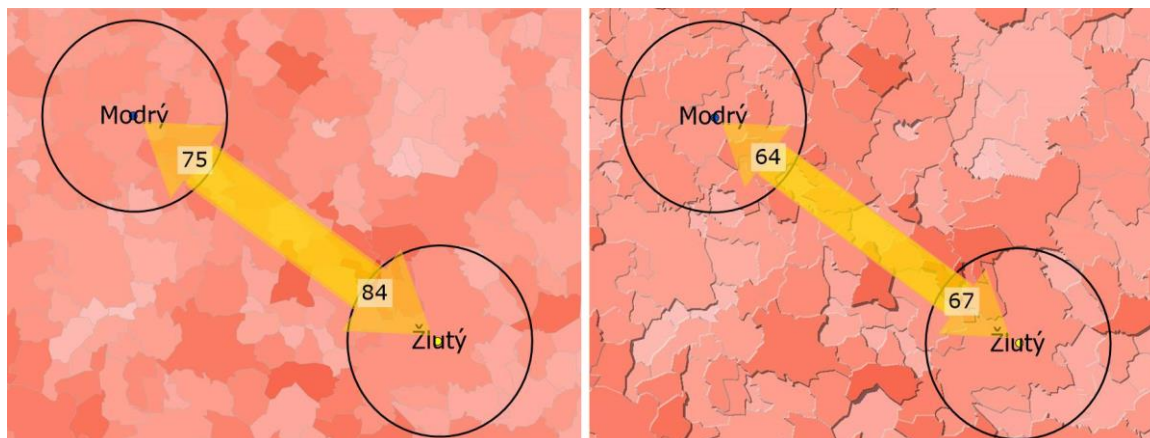
Dvojice stimulů	Trial Duration	Fixation Count	Fixation Frequency	Fixation Duration	Scanpath Length
Q1	0,583	0,544	0,992	0,286	0,488
Q2	0,299	0,408	0,576	0,501	0,317
Q3	0,172	0,464	0,931	0,035	0,002
Q4	0,112	0,019	0,007	0,943	0,453
Q5	0,373	0,167	0,389	0,733	0,039
Q6	0,567	0,383	0,560	0,425	0,343
Q7	0,444	0,580	0,707	0,923	0,031
Q8	0,622	0,908	0,736	0,152	0,033



Obr. 72 Hodnoty Scanpath Length pro dvojice otázek srovnávajících jednoduchý a stínovaný kartogram experimentu 3D Thematic – Arealy. 3D varianta stimulu je označena šedou barvou.

U metriky Scanpath Length byl statisticky významný rozdíl mezi jednoduchým a stínovaným kartogramem zjištěn u čtyř dvojic otázek (Q3, Q5, Q7 a Q8). Vyšší hodnoty metriky Scanpath Length byly zjištěny u jednoduchého kartogramu (2D) u otázek Q1, Q5, Q7 a Q8. U otázek Q2, Q3, Q4 a Q6 byly vyšší hodnoty naopak zjištěny u stínovaného kartogramu (obr. 72). Nejvyšší hodnoty metriky Scanpath Length byly naměřeny u dvojice stimulů Q7. Tato skutečnost byla způsobena tím, že na této dvojici stimulů byly označené areály umístěné daleko od sebe. Proto byla délka trajektorie pohledu oka výrazně vyšší než u ostatních otázek, kde byly areály blíže u sebe. Na obrázku 73 je znázorněn výřez ze

stimulů otázky Q7 s vyznačenými oblastmi zájmu okolo porovnávaných areálů. Šipky znázorňují počet přesunů pohledu mezi těmito oblastmi (AOI Transitions). Je patrné, že u stínovaného kartogramu (vpravo) je počet přesunů pohledu nižší než u jednoduchého kartogramu, což znamená, že k určení velikosti zobrazovaného jevu stačil respondentům u stínovaného kartogramu menší počet přesunů pohledu.



Obr. 73 Počet přesunů pohledu mezi oblastmi zájmu na dvojici stimulů Q7 experimentu 3D Thematic – Areal

Závěr experimentu 3D Thematic – Areal

Ve dvou částech experimentu 3D Thematic – Areal byl porovnáván jednoduchý kartogram s prostorovým a stínovaným kartogramem.

Při porovnání jednoduchého a prostorového kartogramu byl vyšší počet správných odpovědí zjištěn u prostorového kartogramu (H1 ověřena). Statisticky významné rozdíly byly zjištěny u tří dvojic z osmi. Oproti očekávání měli vyšší počet správných odpovědí nekartografové, nicméně rozdíl mezi kartografy a nekartografy nebyl statisticky významný (H2 nebyla potvrzena). Z analýzy oblastí zájmu vyplynulo, že se respondenti řídili převážně porovnáním barev označených areálů a srovnání s okolními areály nevěnovali pozornost. U čtyř z pěti testovaných eye-tracking metrik byl zjištěn statisticky významný rozdíl, přičemž vyšší hodnota byla zaznamenána pro 3D variantu kartogramu (H3 nebyla potvrzena).

U porovnávání jednoduchého a stínovaného kartogramu byl zjištěn výrazně vyšší počet správných odpovědí než v předchozím případě. Vyšší podíl správných odpovědí byl zaznamenán u 3D varianty, přičemž o statisticky významný rozdíl se jednalo u tří dvojic z osmi (H4 potvrzena). Vyšší počet správných odpovědí byl zaznamenán u kartografů, ale výsledky nebyly statisticky významné (H5 nebyla potvrzena). Při statistickém hodnocení rozdílů mezi 2D a 3D variantou pro pět eye-tracking metrik u všech otázek dohromady nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly. Při testování každé dvojice otázek zvláště byly statisticky významné rozdíly u většiny metrik nalezeny pouze u několika dvojic otázek. U otázky Q7 byla provedena analýza přesunů pohledu mezi vyznačenými oblastmi zájmu (AOI Transitions), která ukázala, že u vzdálených areálů na stínovaném kartogramu respondenti provedli nižší počet přechodů než u areálů na jednoduchém kartogramu.

Závěrem experimentu 3D Thematic – Areal lze konstatovat, že prostorový kartogram poskytuje podmínky pro vyšší správnost odpovědí, nicméně respondenti potřebují k řešení úkolu více času. Hypotéza, že stínovaný kartogram je pro rozlišení hodnot charakteristiky zobrazeného jevu vhodnější než jednoduchý kartogram, se nepotvrdila.

7.2. Tematické 3D mapy – bodové znaky

Kartografové a geografové již dlouho experimentují s 3D bodovými znaky jako jsou krychle, koule nebo složitější objekty. Použitím 3D bodových znaků vznikají vizuálně atraktivní mapy, nicméně velká část uživatelů mapy není schopná správně odhadnout velikost zobrazených znaků (Dent, 1990). Přesto je vizualizace 3D bodových znaků v praxi používána (např. (Zsoldi, 2011)).

Díky rozšíření aplikace Google Earth jsou často zobrazovány tematické mapy na virtuálních glóbech například jako 3D bodové znaky (3D proportional symbols) pomocí nástroje Thematicmapping.org (Sandvik, 2011). Díky zakřivení (virtuálního) glóbu je možné najednou vidět pouze jednu polovinu glóbu. V oblastech vzdálených od středu promítání dochází k výraznému zkreslení velikosti zobrazovaných 3D objektů a pro uživatele může být obtížné určit jejich skutečnou velikost (Svatonova a Rybansky, 2014).

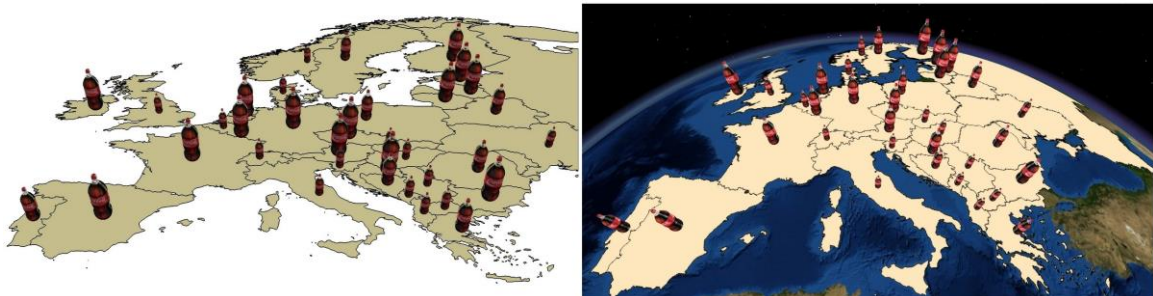
Cílem experimentu 3D Thematic – Points bylo porovnání dvou způsobů vizualizace 3D bodových znaků – zobrazení na mapě a na glóbu.

7.2.1. Design E-T experimentu „3D Thematic – Points“

Eye-tracking experiment 3D Thematic – Points obsahoval sadu osmi dvojic stimulů – vizualizaci 3D bodových znaků na mapě a na virtuálním glóbu (DVD příloha 5.1 a vázaná příloha 7). V obou případech byla respondentům zobrazena mapa Evropy obsahující 3D bodové znaky reprezentující hodnoty kvantitativní charakteristiky fiktivního jevu. Znaky byly rozděleny do tří velikostních kategorií. Úkolem respondentů bylo určit, které ze znaků patří do druhé (prostřední) velikostní kategorie. Cílem experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

- H1: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u perspektivního pohledu na mapu
- H2: Určení správné velikostní kategorie bodových znaků bude obtížnější u virtuálního glóbu

Stimuly byly vytvořeny v prostředí ArcScene a ArcGlobe. Trojrozměrné bodové znaky připravené v aplikaci Trimble SketchUp byly umístěny do centroidů evropských států. Rozřazení do kategorií proběhlo pomocí generátoru náhodných čísel (Random.org, 2015). Rozdíl ve velikosti znaků mezi jednotlivými kategoriemi byl v obou případech (ArcScene i ArcGlobe) 10 bodů. Velikost zorného pole byla v obou aplikacích nastavena na 55°. Úhel kamery byl nastaven tak, aby byla ve stimulu zobrazena celá Evropa (obr. 74).



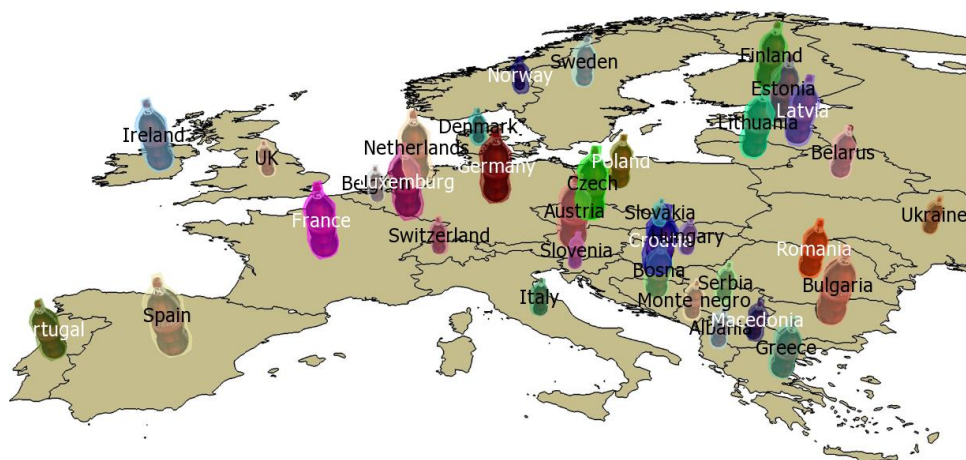
Obr. 74 Dvojice stimulů Q1 experimentu 3D Thematic – Points. Hodnota charakteristiky fiktivního jevu je vyjádřena pomocí 3D bodových znaků na perspektivním pohledu na mapu (vlevo) a virtuálním glóbu (vpravo).

Experimentu se zúčastnilo 40 respondentů. Dvacet z nich byli studenti kartografie, zbývajících dvacet byli respondenti, kteří kartografii nestudují a kartografií se hlouběji nezabývají. Během experimentu byl kromě záznamu pohybu očí zaznamenáván také

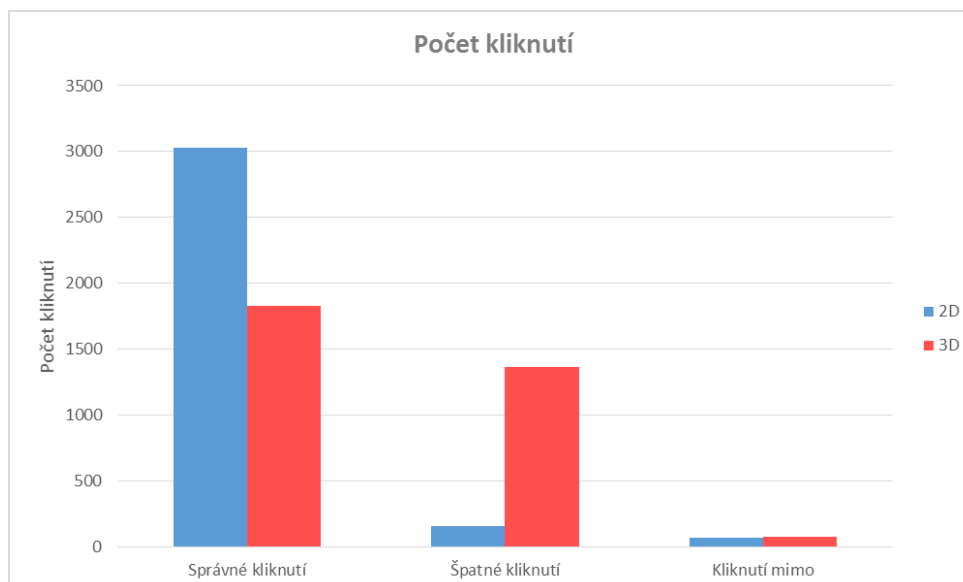
obrazový a zvukový záznam respondenta. Po skončení experimentu byli respondenti tázáni, která z variant pro ně byla vhodnější pro řešení úkolu. Již během experimentu bylo z komentářů respondentů patrné, že zobrazení 3D bodových znaků na virtuálním glóbu je pro řešení úkolu výrazně náročnější než na mapě.

7.2.2. Eye-tracking analýza dat experimentu „3D Thematic – Points“

Prvním krokem při analýze naměřených eye-tracking dat bylo zhodnocení správnosti odpovědí. Úkolem respondentů bylo (pomocí kliku myši přímo do stimulu) označit všechny bodové znaky prostřední velikostní kategorie. Ve všech stimulech byly vytvořeny oblasti zájmu okolo všech bodových znaků (obr. 75) a u nich bylo v prostředí SMI BeGaze do pole „Group“ zaznamenáno, zda se jedná o správnou odpověď (znak z prostřední velikostní kategorie) či nikoliv.

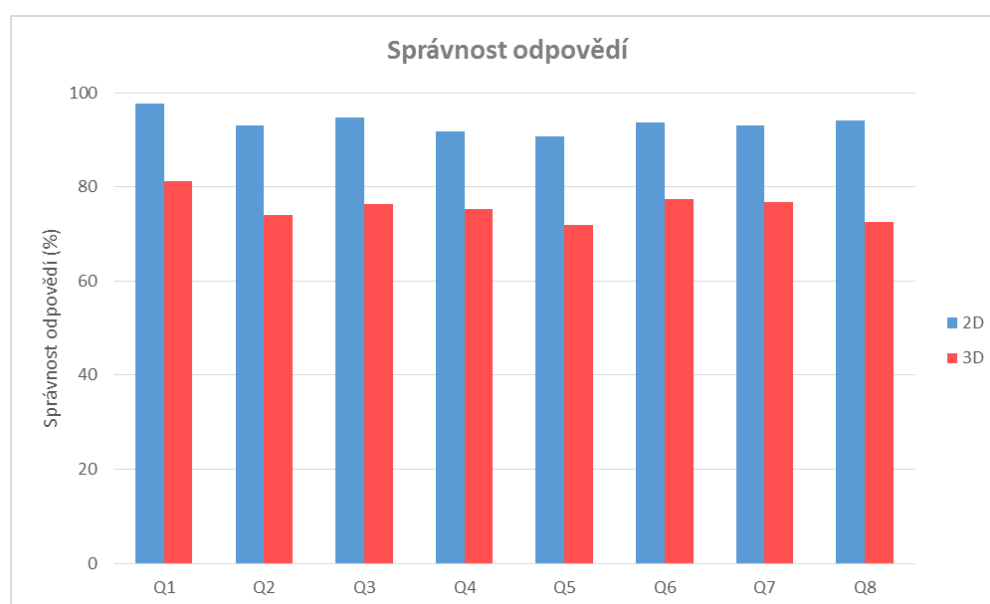


Obr. 75 Oblasti zájmu vyznačené ve stimulu Q1 experimentu 3D Thematic – Points. Ke každé oblasti zájmu bylo zaznamenáno, zda se jedná o správnou odpověď či nikoliv.



Obr. 76 Počet kliknutí zaznamenaných v oblastech zájmu u všech stimulů experimentu 3D Thematic – Points. „Správné kliknutí“ znamená označení AOI z prostřední velikostní kategorie, „špatné kliknutí“ označení AOI z první nebo třetí kategorie a „kliknutí mimo“ znamená kliknutí mimo jakoukoliv vyznačenou oblast zájmu.

V naměřených datech je možné pro jednotlivé oblasti zájmu zobrazit, v jakém čase v ní bylo zaznamenáno kliknutí myši. Nejprve bylo analyzováno, zda respondent kliknul do AOI v druhé (prostřední velikostní) kategorii (správné kliknutí), nebo velikost neodhadl správně a zvolil znak z první nebo třetí kategorie (špatné kliknutí). Ke kliknutí mimo vyznačené oblasti zájmu mohlo dojít buď nepřesností při kliknutí, nebo omylem při manipulaci s myší. Ze všech 6518 kliků zaznamenaných během experimentu k tomu došlo pouze u 65 kliknutí v případě mapy a u 76 kliknutí u virtuálního glóbu. Z grafu na obrázku 76 je patrné, že výrazně vyšší počet správných odpovědí byl zaznamenán u 2D mapy. Extrémní rozdíl byl zaznamenán v kategorii „špatné kliknutí“. V případě 2D mapy bylo nesprávně označených pouze 157 bodových znaků, zatímco v případě virtuálního glóbu se jednalo o 1363 nesprávných odpovědí.



Obr. 77 Správnost odpovědí zaznamenaných během experimentu 3D Thematic – Points. Jako správná odpověď bylo uvažováno označení znaku z prostřední velikostní kategorie a také neoznačení znaku z první nebo třetí kategorie.

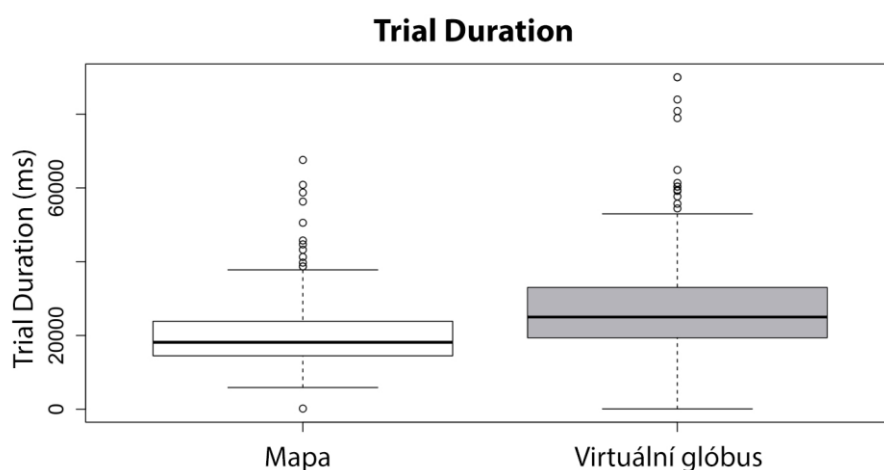
Druhým krokem analýzy správnosti odpovědí bylo zhodnocení pro jednotlivé otázky. Při této analýze byla zohledněna i situace, kdy respondent neoznačil bodový znak, který měl označit. Jako správná odpověď bylo uvažováno označení znaku z prostřední velikostní kategorie a také neoznačení znaku z první nebo třetí kategorie. U všech otázek byla správnost odpovědí vyšší v případě 2D mapy (obr. 77). Data byla otestována pomocí testu dobré shody a statisticky významné rozdíly byly zjištěny pro všechny dvojice stimulů.

Tab. 30 Výsledky hodnocení rozdílu mezi mapou (2D) a virtuálním globem (3D) experimentu 3D Thematic – Points pro pět hodnocených eye-tracking metrik.

2D vs. 3D	α	W	p-value	výsledek
Trial Duration	0,05	28843,5	<0,001	Zamítáme H_0
Fixation Count	0,05	29297,5	<0,001	Zamítáme H_0
Fixation Frequency	0,05	52095,0	0,702	H_0 nelze zamítnout
Fixation Duration	0,05	44260,0	0,003	Zamítáme H_0
Scanpath Length	0,05	42525,0	<0,001	Zamítáme H_0

Po vyhodnocení správnosti odpovědí následovala statistická analýza pěti eye-tracking metrik a statisticky významné rozdíly mezi mapou a virtuálním glóblem byly nalezeny u čtyř z nich (tab. 30). Výjimkou byla metrika Fixation Frequency. Počet fixací za sekundu se tedy statisticky významně nelišil.

Vyšší hodnoty všech eye-tracking metrik byly zaznamenány u stimulů s virtuálními glóby. Řešení úkolu nad těmito stimuly trvalo respondentům delší dobu (obr. 78), a proto byl zaznamenán vyšší počet fixací a také trajektorie pohybu oka (Scanpath Length) byly delší.



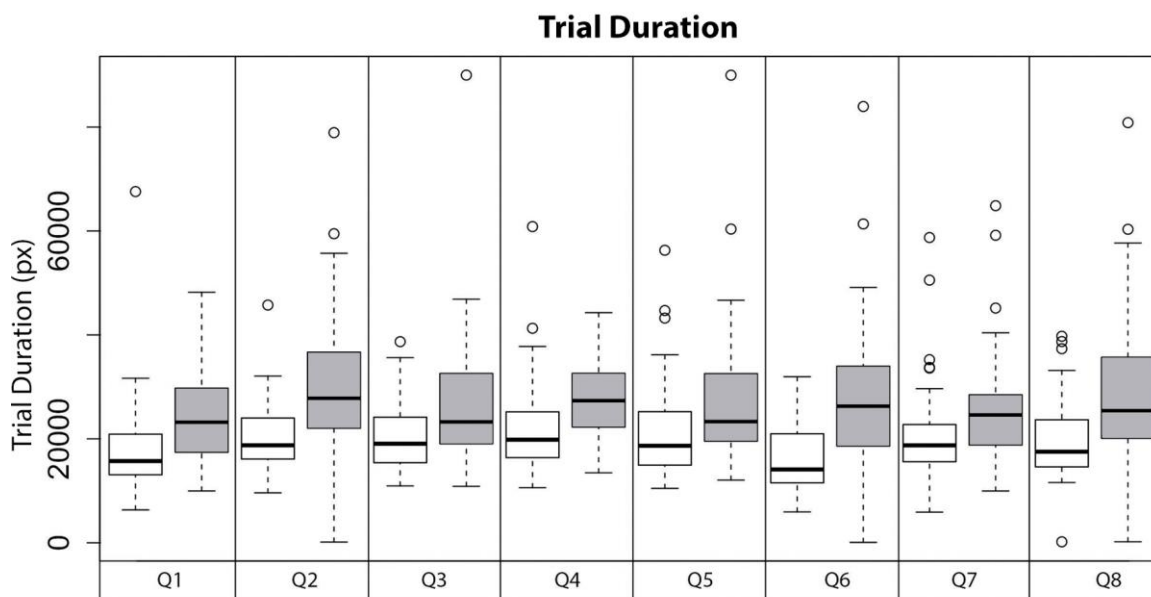
Obr. 78 Hodnoty Trial Duration pro stimuly obsahující mapu (vlevo) a virtuální glóbus (vpravo) v experimentu 3D Thematic – Points. Řešení úkolu trvalo respondentům delší dobu u virtuálního glóbu.

Při testování eye-tracking metrik pro každou dvojici stimulů zvlášť byly nalezeny statisticky významné rozdíly u metrik Trial Duration, Fixation Count a Scanpath Length. U metrik Trial Duration a Fixation Count byly statisticky významné rozdíly zjištěny pro všechny dvojice stimulů, u Scanpath Length jen u dvojic Q2, Q6 a Q8 (tab. 31).

Tab. 31 Výsledky hodnocení rozdílů pěti analyzovaných eye-tracking metrik mezi mapou (2D) a virtuálním glóblem (3D) experimentu 3D Thematic – Points pro každou dvojici otázek zvlášť.

	Trial Duration	Fixation Count	Fixation Frequency	Fixation Duration	Scanpath Length
Q1	<0,001	<0,001	0,562	0,308	0,181
Q2	<0,001	<0,001	0,563	0,227	0,031
Q3	0,010	0,020	0,977	0,532	0,920
Q4	<0,001	0,005	0,223	0,273	0,684
Q5	0,005	0,014	0,969	0,189	0,928
Q6	<0,001	<0,001	0,931	0,090	0,003
Q7	0,010	0,010	0,765	0,669	0,090
Q8	<0,001	<0,001	0,534	0,317	0,012

Vyšší hodnoty u všech metrik byly zaznamenány v případě stimulů obsahujících bodové znaky zobrazené nad virtuálním glóblem. Příkladem je boxplot na obrázku 79 zobrazující hodnoty metriky Trial Duration.

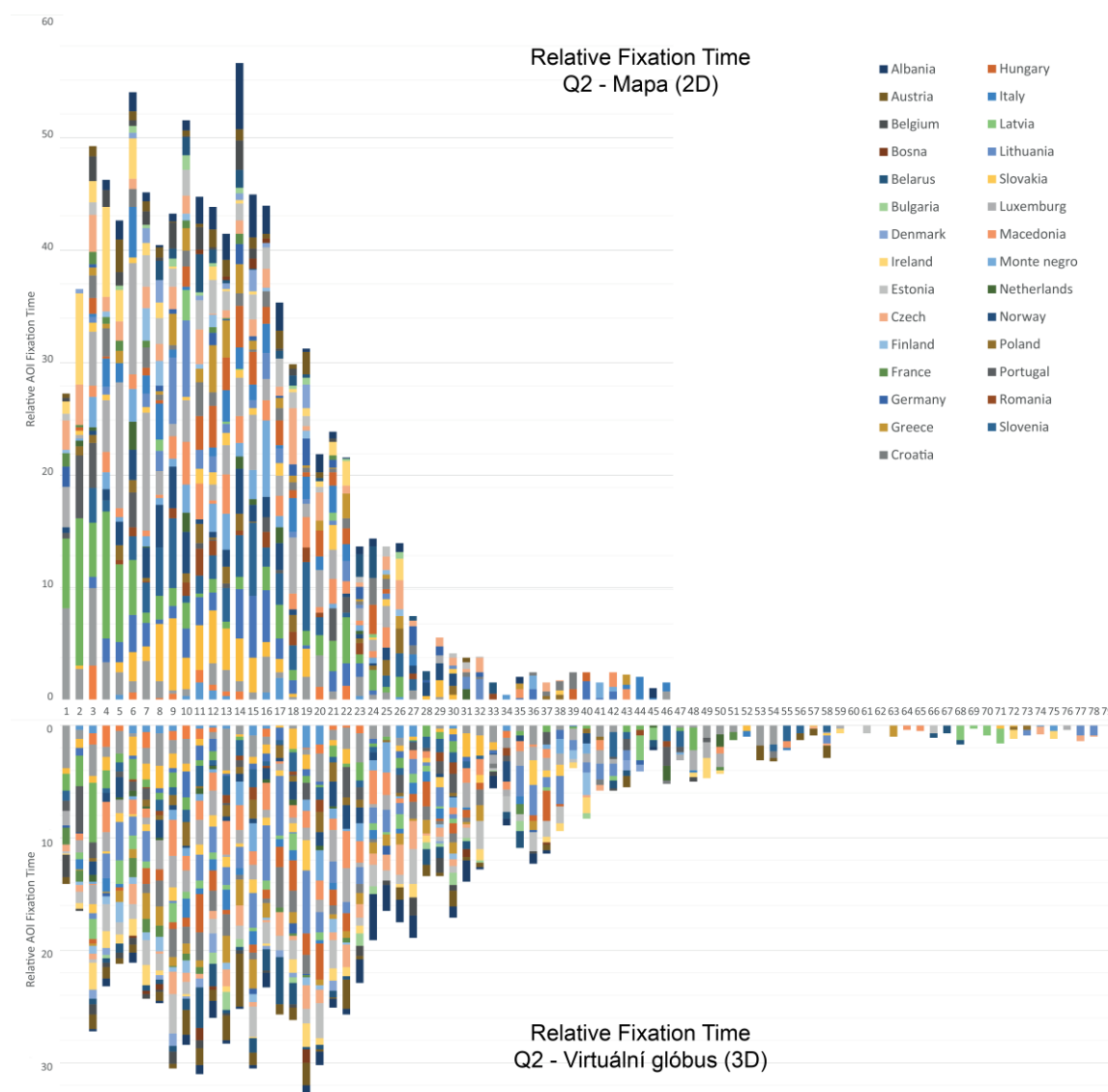


Obr. 79 Hodnoty Trial Duration pro dvojice otázek srovnávajících mapu (2D) a virtuální glóbus (3D) experimentu 3D Thematic – Points. 3D varianta stimulu je označena šedou barvou.

Skutečnost, že řešení zadaného úkolu trvalo delší dobu na stimulu s virtuálním glóbem, lze ověřit i při zobrazení tzv. Binning Chartu. Binning Chart ukazuje statistický přehled navštívených oblastí zájmu pro časové řezy. Pro každý řez je zobrazeno, kolik procent z tohoto času respondenti strávili pohledem v konkrétní oblasti zájmu. Na obrázku 80 je zobrazen Binning Chart pro dvojici stimulů Q2. V horní části obrázku jsou zobrazena data pro 2D mapu. Respondentům trvalo několik málo sekund, než začali porovnávat jednotlivé oblasti zájmu. Proto je na začátku grafu vidět nárůst z hodnoty 25 % až na 50 %. Přibližně v 17. sekundě dochází k prudkému poklesu zobrazených dat. To je způsobeno tím, že někteří z respondentů už měli úkol vyřešený. Ve 46. sekundě již nebyly v žádné z oblastí zájmu zaznamenány žádné fixace.

Oproti tomu řešení stejného úkolu nad virtuálním glóbem (obr. 80 dole) zabralo respondentům více času. U nejpomalejšího z nich byly poslední fixace v oblastech zájmu zaznamenány až v 78. sekundě.

Oblasti zájmu ve stimulu s virtuálním glóbem zabíraly díky perspektivnímu zobrazení menší část plochy stimulu (AOI Coverage). Protože eye-tracker má prostorovou přesnost 0,4°, bylo mnoho fixací zaznamenáno mimo tyto oblasti. Proto dosahují maxima ve spodní části obrázku pouze hodnoty okolo 30 %. Díky této nepřesnosti nemohla být hlouběji analyzována data o pohybu očí vztažená k těmto oblastem zájmu. AOI v tomto experimentu byly primárně vytvořeny pro analýzu kliknutí myši a pro tento účel byla jejich velikost dostatečná. V případě, že by byla cílem výzkumu podrobná analýza rozmístění fixací v oblastech zájmu, byla by při tvorbě oblastí zájmu tato nepřesnost uvažována a oblasti zájmu by byly vytvořeny větší.



Obr. 80 Relativní rozmístění fixací všech respondentů v jednotlivých oblastech zájmu v čase u dvojice stimulů Q2 v experimentu 3D Thematic – Points

Závěr experimentu 3D Thematic – Points

V experimentu 3D Thematic – Points byly vytvořené prostorové modely bodových znaků zobrazené na mapě (2D) a virtuálním glóbu (3D). Bodové znaky byly rozdělené do tří kategorií znázorňujících hodnotu kvantitativní charakteristiky fiktivního jevu. Úkolem respondentů bylo označit všechny bodové znaky patřící do prostřední velikostní kategorie. Každá dvojice stimulů obsahovala stejnou sadu bodových znaků, proto bylo porovnání jednotlivých dvojic stimulů jednoznačné. Hypotézou experimentu bylo, že díky perspektivnímu zkresení bude určení velikosti znaků obtížnější v případě virtuálního glóbu. Již při samotném eye-tracking testování bylo z reakcí respondentů patrné, že řešení úkolu nad virtuálním glóbem je problematické a zabere větší množství času. Tuto skutečnost potvrdilo hodnocení správnosti odpovědí i analýza eye-tracking metrik.

Výrazně vyšší počet označení správného bodového znaku byl zaznamenán u stimulů s 2D mapou. Počet označení nesprávných bodových znaků byl v 2D mapě minimální. Vyšší správnost odpovědí v případě 2D mapy se potvrdila u všech osmi testovaných dvojic stimulů (H1 ověřena).

Následně byly testovány eye-tracking metriky. U všech zkoumaných metrik byly zjištěny vyšší hodnoty v případě virtuálního glóbu. Řešení zadaného úkolu tedy respondentům trvalo déle, bylo u nich zjištěno více fixací a trajektorie pohledu oka byla rovněž delší. Ve všech případech kromě metriky Fixation Frequency byly rozdíly statisticky významné (H2 ověřena).

Lze tedy konstatovat, že rozpoznání velikosti bodového znaku bylo nad 3D stimulem (virtuálním glóbem) pomalejší a současně respondenti mnohem více chybovali než v případě zobrazení znaků nad 2D mapou.

8. DC 3 - DOPORUČENÍ PRO EYE-TRACKING VÝZKUM V KARTOGRAFII

Při řešení disertační práce bylo navrženo, provedeno a vyhodnoceno sedm eye-tracking experimentů zaměřených na hodnocení různých typů 3D vizualizace. Kromě nich bylo pod vedením autora realizováno velké množství experimentů, které v práci popsány nejsou a které sloužily buď jako krátké výzkumné studie, nebo pouze pro testování možností eye-trackeru a pro sběr testovacích dat. Poznatky zjištěné při realizaci těchto experimentů jsou popsány v podkapitole 8.1. V podkapitole 8.2 jsou shrnuty výsledky hodnocení metod analýzy eye-tracking dat doplněné o praktické poznatky zjištěné při analýze dat naměřených v průběhu řešení cílů disertační práce.

8.1. Doporučení pro eye-tracking testování

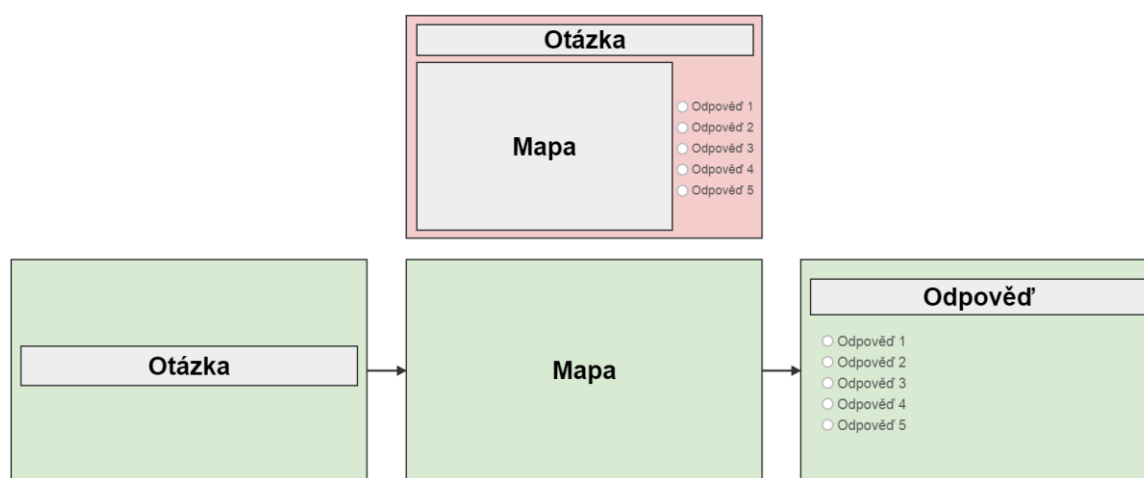
Při tvorbě eye-tracking experimentu je klíčové klást důraz na výběr výzkumné otázky, pečlivou přípravu testovaných stimulů i na vhodné nastavení celého experimentu. Typ použitých stimulů velmi závisí na typu studie a na hypotézách, které mají být během experimentu ověřeny. Obecně lze konstatovat, že využití statických obrázků nebo videí ve stimulech je pro analýzu dat výhodnější než použití screen-recording stimulu (záznam obrazovky překrytý informacemi o pohybu pohledu). Data všech respondentů se naměří nad stejným stimulem a není nutné je analyzovat pro každého respondenta zvlášť (doporučení 1). V disertačním výzkumu byly jako stimuly použity dvojice statických obrázků obsahující 2D a 3D vizualizaci. Z toho důvodu je v této podkapitole kladen důraz právě na práci se stimuly ve formě obrázků.

Před každým testováním je nutné zkalibrovat přístroj podle konkrétního respondenta. Holmqvist (2011) uvádí, že v ideálním případě by maximální odchylka neměla přesáhnout $0,5^\circ$ a že data s odchylkou vyšší než 1° je nutné vyřadit. V disertačních experimentech byla maximální odchylka kalibrace stanovena na $0,7^\circ$ v každém směru (X, Y) jako kompromis mezi přesností zařízení a dobou procesu kalibrace. Pokud experimenty obsahují například malé oblasti zájmu nebo byly analyzovány detailní pohyby oka, je vhodné zvolit ještě menší maximální odchylku, případně zařízení s vyšší přesností. Po dokončení testování byla rovněž zkontrolována kvalita a množství naměřených dat (Tracking Ratio). Jako mezní hodnota bylo stanoveno 90 % z celkové doby prezentace stimulů, u kterých byl pohled respondenta zaznamenáván. Ke ztrátě dat dochází například při mrkání, smíchu, otáčení hlavy směrem od zařízení atd. Pokud bylo Tracking Ratio u některého z respondentů nižší, byl z hodnocení vyřazen a nahrazen jiným respondentem (doporučení 3 a 4).

V prvních experimentech prováděných na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci byly otázky a možné odpovědi umisťovány přímo do stimulu. Obrázky nebyly připravené na rozlišení monitoru, takže buď byla snížena jejich kvalita roztažením na plochu monitoru, nebo nebyla využita celá plocha obrazovky. Při těchto prvních experimentech byly otázky a možné odpovědi umisťovány přímo do stimulu s mapou. Výhodou tohoto přístupu je, že respondent si otázku a odpovědi nemusí pamatovat. Naměřená data jsou ale velmi výrazně ovlivněna opakovaným čtením zadání úkolu, u kterého se respondent nesoustředí na vlastní obsah stimulu. Počet fixací je více ovlivněn množstvím textu v zadání než na testovanou vizualizací. Proto analýza eye-tracking metrik

nemůže být použita pro hodnocení testované vizualizace. Při jedné ze studií (Zieglerová, 2012) bylo testováno použití namluvené otázky, která byla respondentům přehrávána v průběhu prezentace stimulu s mapou. Tento přístup se však také neosvědčil. Ve všech realizovaných experimentech byly proto otázky umístěny do samostatného obrázku prezentovaného před vlastním stimulem (obr. 81) (doporučení 6).

V experimentech, které jsou součástí disertačního výzkumu, byly otázky voleny tak, aby si je respondenti snadno zapamatovali. Při umístění odpovědí přímo do stimulů nastává stejný problém jako u otázky. Pro analýzu dat je vhodnější využití dotazníku (např. stimulus typu questionnaire v SMI BeGaze) vloženého přímo do experimentu za vlastní stimulus, případně označení odpovědi pomocí kliknutí myši přímo do stimulu. Odpovědi respondentů lze následně vyexportovat ve formě tabulky a snáze je analyzovat (doporučení 7 a 8).



Obr. 81 Nevhodně vytvořený stimulus (nahore) a doporučená varianta oddělující otázku a odpovědi od vlastního stimulu (dole)

Při přípravě eye-tracking experimentu je vhodné zajistit, aby trajektorie pohybu oka všech respondentů začínala vždy ve stejném místě stimulu, jinak jsou výsledky ovlivněny různým umístěním začátku trajektorie (každý respondent začal na stimulus dívat z jiného místa). Jednoduchou metodou, jak toho docílit, je vložení samostatného stimulu s fixačním křížem uprostřed obrazovky před stimulus s úlohou. Tento stimulus postačuje zobrazit pouze na 500-600 ms a pohyby očí během jeho prezentace nahrávat. Respondenti se na fixační kříž intuitivně podívají a počátek trajektorie pohledu nastaví na střed stimulu (doporučení 9).

Před každým eye-tracking testováním je vhodné provést pilotní testování na několika respondentech. Během něj lze odhadnout čas testování, zjistit nedostatky použitého experiment-designu a také zkontrolovat, zda se všechna data zaznamenávají. Rovněž je vhodné otestovat metody analýzy a vizualizace, které budou pro finální hodnocení naměřených dat použity. Experimenty v disertační práci obsahovaly maximálně 50 stimulů a doba testování jednoho respondenta nepřesáhla 15 minut. Při experimentech delších než 10 minut pro jednoho respondenta je vhodné použít opakovanou kalibraci (doporučení 5, 10). Opakovaná kalibrace byla využita například u experimentů 3D Thematic – Arels a 3D Thematic – Points.

Otázka doporučeného počtu respondentů pro jeden experiment je řešena ve velkém množství odborné literatury (např. Bojko (2013), Holmqvist (2011)). Pro kvalitativní

hodnocení postačuje menší počet respondentů než pro hodnocení kvantitativní (Nielsen, 2012). Tabulka 2 na straně 18 obsahuje souhrn nejvýznamnějších kartografických eye-tracking studií. V těchto studiích je průměrný počet respondentů 17. Velice často je užíváno 32 respondentů. Tento počet doporučuje i Bojko (2013). Ve všech experimentech v disertační práci bylo využito 40 respondentů. Ve většině případů byla polovina z nich studenti kartografie a druhá polovina studenti nekartografických oborů (doporučení 11).

S počtem respondentů souvisí i volba designu experimentu. Ve všech experimentech v disertační práci byl zvolen within-subject design. Otázka volby mezi within-subject a between-subject designem je v odborné literatuře (Bojko, 2013) rovněž velmi často zmiňována. Důvody pro volbu within-subject jsou podrobně popsány v podkapitole 2.1. Při within-subject designu vidí všichni respondenti všechny stimuly, a proto je nutné jednu z variant v každé dvojici upravit tak, aby si respondent nepamatoval odpověď z druhé varianty. Změny by však měly být voleny tak, aby co nejméně ovlivnily respondentovo chování při řešení otázky. Náhodné pořadí prezentovaných stimulů rovněž pomůže při odstranění efektu učení (doporučení 2, 12, 13 a 14).

Doporučení pro eye-tracking testování popsané v předchozím textu jsou shrnuta do následujících bodů (viz níže). Většina doporučení se opírá o zkušenosti autora z experimentů popsaných v disertační práci. Doporučení jsou formulována ve vztahu k hodnocení dvou variant kartografického díla (v tomto případě 2D a 3D map). Většina z nich je obecně platná, ale je vždy nutné přihlídnout k účelu testování a hypotézám, které mají být během experimentu ověřeny.

Doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu

1. Preferovat statické obrázky pro stimuly
2. Stimuly řadit v náhodném pořadí
3. Nepřekračovat maximální odchylku kalibrace 0,7°
4. Respondenty s Tracking Ratio nižším než 90 % vyřadit z analýzy
5. Vždy provádět pilotní testování pro odhalení nedostatků připravovaného experimentu
6. Zadání otázky neumisťovat přímo do stimulu, ale na zvláštní stimulus zařazený před vlastním úkolem
7. Zadání otázky volit co nejjednodušší, aby si ho respondenti snadno a přesně zapamatovali
8. Pro rychlejší analýzu odpovědí volit stimulus typu questionnaire
9. Před každý stimulus umístit fixační kříž na dobu 500-600 ms
10. Délkou testování nepřesahovat 15 minut, jinak respondenti neudrží pozornost
11. Do testování zapojit alespoň 30-40 respondentů
12. Preferovat within-subject design
13. Při použití within-subject designu upravovat jednu variantu stimulu pro zamezení efektu učení
14. Neumisťovat dva typy map do jednoho stimulu (více fixací by bylo zaznamenáno v levé části stimulu)

8.2. Doporučení pro analýzu eye-tracking dat

Existuje obrovské množství metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat. Vyčerpávající souhrn je obsažen například v publikaci (Holmqvist a kol., 2011), výběr netradičních metod popisuje Blascheck (2014). Všechny metody však nejsou vhodné pro analýzu map a kartografických děl. V podkapitole 4.2 bylo popsáno 15 metod, které lze pro analýzu eye-

tracking dat z kartografických úloh použít. Výběr rozhodně není úplný, ale na základě studia kartografické literatury a podle autorových zkušeností je tento výčet více než dostatečný.

Většina z popsaných metod je určena k analýze fixací a sakád. Ještě před vlastní analýzou je nutné z prvotních (raw) dat identifikovat tyto základní pohyby oka. K tomuto účelu lze využít velký počet algoritmů. Mezi nejčastěji využívané patří I-DT a I-VT. Platí, že pro data pořízená nižší frekvencí (méně než 250 Hz) je vhodnější použít algoritmus I-DT. V podkapitole 4.1.2 bylo testováno několik nastavení tohoto algoritmu. Bylo zjištěno, že při použitém kartografickém stimulu naměřená data nejlépe vystihovalo nastavení Duration 80 ms a Dispersion 50 px. Kontrola správnosti nastavení algoritmu byla provedena porovnáním prvotních (raw) dat a identifikovaných fixací. Zvolené nastavení bylo použito při analýze dat ze všech eye-tracking experimentů obsažených v disertační práci (doporučení 1 – 4).

Při výběru vhodné metody analýzy a vizualizace naměřených eye-tracking dat je vhodné řídit se především typem použitých stimulů a hypotézami, které mají být analýzou ověřeny. Podrobný popis 15 vybraných metod je obsažen v podkapitole 4.2. Metody byly dle typu rozděleny do několika skupin:

Metody **vizualizace trajektorií** (podkapitola 4.2.1) – Jsou důležité zejména pro získání přehledu o rozložení fixací a jejich pořadí ve stimulu nebo pro ověření kvality naměřených dat. Pokročilou metodou vizualizace trajektorií v čase je Space-Time-Cube. Ke správné interpretaci výsledků je nutné interaktivní zobrazení Space-Time-Cube, jinak je získání představy o průběhu trajektorií pohybu očí v čase velice složité (doporučení 5 a 6).

Metody porovnání trajektorií **Scanpath Comparison** (podkapitola 4.2.2) – Popsány byly dvě metody, a to String-edit distance a PSA. Tyto metody je výhodné použít pro výzkum rozdílů ve čtení stimulu mezi několika skupinami respondentů. Metoda String-edit distance je vhodná především pro stimuly, kde lze jednoduše definovat oblasti zájmu (např. kompoziční prvky mapy). V opačném případě je vhodnější použít metodu PSA, přestože je její nastavení technicky náročnější (doporučení 7 a 8).

Metody **Attention Maps** (podkapitola 4.2.3) – Attention maps jsou vhodné pro zjištění rychlého přehledu o prostorovém rozložení fixací ve stimulu. Pro detailní analýzu dat ale příliš vhodné nejsou. Data jsou obvykle agregována za více respondentů a výsledek může být ovlivněn i jedním uživatelem, který se choval odlišně od zbytku skupiny. Z výsledné mapy nelze tuto skutečnost žádným způsobem rozpoznat (doporučení 9).

Metody **analýz oblastí zájmu (AOI)** (podkapitola 4.2.4) – Do skupiny patří jak statistické hodnocení eye-tracking metrik, tak i několik metod vizualizace (např. Sequence Chart, Binning Chart, AOI Transitions). Tyto analýzy je vhodné použít zejména v případech, kdy stimulus obsahuje jednoduše rozlišitelné prvky, okolo kterých mohou být oblasti zájmu vymezeny. Při vytváření oblastí zájmu je nutné uvažovat nepřesnosti měření a zakreslit oblast zájmu větší než je vlastní prvek ve stimulu (doporučení 10).

GIS analýzy v programu V-Analytics (podkapitola 4.2.5) – Program V-Analytics je určen k vizuální analýze časoprostorových dat a je možné jej využít i pro analýzu eye-tracking dat (Andrienko a kol., 2012). Z metod popsaných v článku (Andrienko a kol., 2012) byly vybrány, popsány a hodnoceny metody FlowMap a TimeLine. Velmi přínosné je zejména využití metody FlowMap, která zobrazuje výsledky diskrétní prostorové a časoprostorové agregace trajektorií. Jejím použitím lze přehledně zobrazit agregovanou trajektorii pohledu oka všech respondentů (doporučení 11).

Metoda **manuální analýzy dat** (podkapitola 4.2.6) – Tuto metodu je výhodné použít při analýze dynamických stimulů. Manuální záznam fixací nad jednotlivými prvky ve stimulu je rychlejší než tvorba dynamických oblastí zájmu (doporučení 12).

Metody **statistického vyhodnocení eye-tracking dat** (podkapitola 4.2.7) – Přestože eye-tracking metrik existuje velké množství (Holmqvist a kol., 2011), obvykle je jich využíváno pouze několik. Z analýzy publikovaných kartografických studií (tabulka 2 na straně 18) vyplynulo, že nejčastěji jsou využívány metriky Fixation Duration, Total Dwell Time, Fixation Count, Scanpath Length a Time to First Fixation (obr. 28). Kromě těchto metrik byla v disertační práci často využívána metrika Trial Duration ukazující čas potřebný k vyřešení zadaného úkolu. Statistické hodnocení těchto metrik bylo provedeno pomocí dvouvýběrového Wilcoxonova testu. V případě srovnávání více než dvou datových sad je místo Wilcoxonova testu možné použít Kruskal-Wallisův test (doporučení 13).

Doporučení pro analýzu eye-tracking dat v kartografickém výzkumu

1. Pro klasifikaci fixací a sakád z naměřených dat při vzorkovací frekvenci nižší než 250 Hz používat algoritmus I-DT
2. Nastavovat v algoritmu I-DT Duration na 80 ms a Dispersion na 50 px
3. Nastavení identifikačního algoritmu ověřit vizuálním porovnáním fixací a prvotních (raw) dat
4. Popsat zvolené nastavení identifikace fixací a sakád v odborných publikacích
5. Metody GazeReplay, Scanpath a Attention Maps využívat zejména pro kontrolu naměřených dat
6. Výstupy metody Space-Time-Cube prezentovat raději v interaktivní podobě
7. Pro analýzu rozdílů strategie čtení stimulů mezi skupinami respondentů využívat metod Scanpath Comparison
8. Pokud lze jednoduše vytvořit oblasti zájmu, využívat metodu String-edit distance, v opačném případě raději metodu PSA
9. V odborných člancích neuvádět výstupy metody Attention Maps bez komentáře
10. Oblasti zájmu definovat větší než vlastní prvek ve stimulu
11. Pro zobrazení agregovaného průběhu trajektorií pohledu všech respondentů preferovat metodu FlowMap
12. Pro rychlejší analýzu dynamického stimulu preferovat manuální analýzu dat před tvorbou dynamických oblastí zájmu
13. Používat často analyzované metriky – Fixation Duration, Total Dwell Time, Fixation Count, Scanpath Length, Time to First Fixation a Trial Duration
14. Výběr metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat provádět podle rozhodovacího schématu na obrázku 29 a tabulky 12 v podkapitole 4.3

9. VÝSLEDKY

Dílčí cíle disertační práce byly zaměřeny na výběr a hodnocení metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat v kartografii (DC 1), jejich využití při řešení praktických případových studií v oblasti 3D vizualizace (DC 2) a vytvoření doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu (DC 3).

DC 1 - Hodnocení metod analýzy eye-tracking dat

Před analýzou naměřených eye-tracking experimentů je nutné z prvotních (raw) dat vytvořit data klasifikovaná na fixace a sakád. Při řešení prvního dílčího cíle byla provedena rešerše kartografických eye-tracking studií a byly zjištěny používané nastavení prahových hodnot identifikačních algoritmů. Tři vybraná nastavení byla porovnána a následně upravena tak, aby co nejlépe vystihovala průběh prvotních dat. Pro identifikaci fixací a sakád byl použit algoritmus I-DT s nastavením prahové hodnoty pro Duration na 80 ms a Dispersion na 50 px.

Rozhodovací schéma pro výběr optimální metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat obsahuje čtyři kritéria rozhodování: Typ naměřených dat, Zachování prostorové složky, Agregace dat a Možnost porovnání. Podrobný popis jednotlivých kritérií a vlastní rozhodovací schéma je popsáno na obrázku 29 v podkapitole 4.3.

Metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat byly ohodnoceny z hlediska technické náročnosti a rychlosti jejich použití. Hodnocení bylo vytvořeno na základě expertního odhadu na základě zkušeností autora (tabulka 12 v podkapitole 4.3).

Výsledky prvního dílčího cíle (viz kapitola 4) jsou:

1. Postup pro výběr optimálního nastavení algoritmu I-DT pro detekci fixací a sakád a doporučené hodnoty pro kartografický výzkum
2. Rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat
3. Hodnocení metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat podle náročnosti a rychlosti jejich použití

Výsledky prvního dílčího cíle již byly publikovány v následujících titulech:

- **Popelka, S.** (2014): Optimal eye fixation detection settings for cartographic purposes. SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings Volume I STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 8 s.
- **Popelka, S.**, Dvorsky, J., Brychtova, A., Hanzelka, J. (2013): User typology based on eye-movement paths. SGEM 2013 Conference Proceedings Volume I STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1049.
- **Popelka, S.**, Voženílek (2012): Specifying of Requirements for Spatio-Temporal Data in Map by Eye-Tracking and Space-Time-Cube. Proceedings of International Conference on Graphic and Image Processing Singapore, 5 s.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Voženílek, V. (2012): Eye-tracking a jeho využití při hodnocení map. Geografický časopis Geografický ústav SAV, s. 71-87.
- Brychtová, A., **Popelka, S.**, Dobešová, Z. (2012): Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles. SGEM 2012 Conference Proceedings Volume II, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1048.
- Brychtová, A., **Popelka, S.**, Voženílek, V. (2012): The analysis of eye movement as a tool for evaluation of maps and graphical outputs from GIS. Geography and Geoinformatics: Challenges for practise and education, Masarykova univerzita, s. 154-163.

DC 2 - Návrh, sestavení, průběh a vyhodnocení E-T experimentů

Při řešení druhého dílčího cíle disertační práce (kapitoly 5, 6 a 7) byl zkoumán vliv 2D a 3D vizualizace v mapě na její čtení uživatelem. Bylo navrženo, vytvořeno, provedeno a vyhodnoceno sedm eye-tracking experimentů, které jsou popsány v kapitolách 5, 6 a 7. Experimenty byly zaměřené na porovnání uživatelského vnímání 2D a 3D vizualizace pro mapy reliéfu (kapitola 5), vizualizace měst (kapitola 6) a tematické mapy (kapitola 7).

3D reprezentace reliéfu (kapitola 5)

V experimentech zaměřených na hodnocení 2D a 3D vizualizace reliéfu byla porovnávána reprezentace reliéfu pomocí vrstevnic a barevné hypsometrie (2D) a perspektivní 3D pohled na stejné území. Eye-tracking testování bylo doplněno o dotazníkové šetření. Z dotazníku vyplynulo, že z hlediska přehlednosti, vhodnosti pro zadaný úkol i estetiky volili respondenti ve většině případů jako lepší 3D variantu – perspektivní pohled.

V prvním experimentu (DualMap, podkapitola 5.1.3) byly obě reprezentace terénu umístěny do jednoho stimulu. Při analýze dat s použitím metriky Dwell Time nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly. Při hlubší analýze výsledků bylo zjištěno, že pořadí map ve stimulu (vlevo-vpravo) ovlivnilo respondenty více než typ použité vizualizace. Z toho důvodu byl vytvořen nový experiment (SingleMap, podkapitola 5.1.4). Další experimenty v disertační práci obsahovaly stimuly pouze s jedním typem vizualizace. Při analýze dat ze SingleMap experimentu byla větší délka trajektorie pohledu oka zaznamenána u kartografů. U většiny eye-tracking metrik nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly mezi 2D a 3D variantou vizualizace, pouze u metriky Scanpath Length byla zaznamenána vyšší hodnota u 3D varianty stimulu. Hledání odpovědi na otázku bylo tedy náročnější u perspektivního pohledu. Provedeno bylo rovněž porovnání trajektorií pohledu pomocí metody Scanpath Comparison (String-edit distance) a bylo zjištěno, že strategie uživatelů při čtení 2D a 3D vizualizace je rozdílná (obr. 43).

Součástí SingleMap experimentu byla i dvojice stimulů porovnávající 3D perspektivní pohled a jeho 2D variantu osvětlenou z jihovýchodu. Bylo ověřeno, že respondenti si takto osvětlený reliéf velmi obtížně představují a uvedli velké množství nesprávných odpovědí. Na hodnocení vlivu stínování na čtení turistických map byl zaměřen eye-tracking experiment Shading – Mapy.cz (podkapitola 5.2.3). Úkolem respondentů bylo nalezení a označení konkrétního vrcholu nebo obce v mapě. V dotazníku, doplňujícím eye-tracking experiment, většina respondentů odpověděla, že z estetického hlediska se jim více líbí stínovaná (3D) varianta mapy (obr. 47). Statisticky významné rozdíly mezi stínovanou a nestínovanou mapou byly zjištěny v případě tří ze čtyř hodnocených eye-tracking metrik. Vyšší hodnoty většiny metrik byly zaznamenány v případě stínované varianty mapy. Výsledky experimentu dokázaly, že stínované mapy jsou pro vyhledávání obce či vrcholu méně vhodné než jejich nestínovaná varianta, a to zejména v případě hledání obce (obr. 54).

Výsledky experimentů zaměřených na 3D reprezentaci reliéfu (viz kapitola 5) jsou:

1. Z dotazníkového šetření vyplynulo, že respondenti lépe hodnotí 3D vizualizaci reliéfu
2. Hledání odpovědi na otázku bylo náročnější na 3D vizualizaci reliéfu
3. Při použití stínování v mapě je vhodné zvolit osvětlení ze severozápadu
4. Stínování v turistických mapách se respondentům z estetického hlediska líbilo více
5. Hledání vrcholu nebo obce bylo rychlejší na nestínované variantě turistické mapy
6. Hledání obce na turistické mapě bylo náročnější než hledání vrcholu

3D vizualizace měst (kapitola 6)

Pro výzkum hodnocení 3D vizualizace zástavby byly vytvořeny dva eye-tracking experimenty. První z nich byl zaměřen na fotorealistickou vizualizaci zaniklé obce, druhý na nefotorealistickou vizualizaci bloků budov používanou v mapových portálech.

V případě free-viewing stimulů (bez otázky) zobrazujících pohled na zaniklou obec v experimentu Extinct Village (podkapitola 6.1) byl nejmenší počet fixací zjištěn u varianty zobrazující fotorealistický 3D model obce (obr. 57). Při hledání konkrétní budovy v obci byl pro respondenty nejvhodnější 3D model obce (obr. 60).

V dotazníku doplňujícím eye-tracking experiment 3D – Cities (podkapitola 6.2) respondenti uvedli, že pro zodpovězení otázky (hledání bodového znaku) byla vhodnější varianta bez vizualizace budov (2D). Z hlediska estetiky byly odpovědi mezi 2D a 3D variantou vyrovnané (obr. 62). Z analýzy čtyř eye-tracking metrik vyplynulo, že na nakloněné variantě mapy (stimulus 9 z portálu F4 map) se respondenti obtížně orientovali (obr. 63). Stimulus obsahující nakloněnou mapu zkresloval výsledky analýz, proto byl z hodnocení vyřazen. Po tomto vyřazení nebyly mezi 2D a 3D stimuly nalezeny statisticky významné rozdíly pro žádnou ze sledovaných eye-tracking metrik. Při další analýze nebylo zjištěno, že by typ vizualizace (2D, 3D) statisticky významně ovlivnil uživatelskou percepci map měst.

Výsledky experimentů zaměřených na 3D reprezentaci měst (viz kapitola 6) jsou:

7. Pro vizualizaci zaniklé obce byl pro respondenty nejvhodnější 3D model
8. Respondenti nepreferovali 2D ani 3D variantu map měst z estetického hlediska, pro hledání bodového znaku označili jako vhodnější 2D mapu
9. Respondenti se obtížně orientovali v nakloněné mapě města
10. Typ vizualizace (2D, 3D) městské zástavby neovlivnil uživatelskou percepci mapy při hledání bodového znaku

Tematické 3D mapy (kapitola 7)

Pro eye-tracking hodnocení tematických 3D map byly vybrány dvě metody tematické kartografie – kartogramy a 3D bodové znaky.

Ve dvou částech experimentu 3D Thematic – Areal (podkapitola 7.1) byl porovnáván jednoduchý kartogram s prostorovým a stínovaným kartogramem. Úkolem respondentů bylo porovnat velikost kvantitativní charakteristiky jevu v označených areálech. Při porovnání jednoduchého (2D) a prostorového kartogramu (3D) byl vyšší počet správných odpovědí zaznamenán u prostorového kartogramu (obr. 67). U čtyř z pěti studovaných eye-tracking metrik byl zjištěn statisticky významný rozdíl, přičemž vyšší hodnota většiny metrik byla zaznamenána pro 3D kartogram. Lze tedy konstatovat, že prostorový kartogram poskytuje podmínky pro vyšší správnost odpovědí, nicméně respondenti potřebují k řešení úkolu více času. Hypotéza, že stínovaný kartogram bude pro řešení úkolů vhodnější, se nepotvrdila. Správnost odpovědí byla vyšší než u jednoduchého kartogramu, nicméně výsledky nebyly statisticky významné.

V experimentu 3D Thematic – Points (podkapitola 7.2) byly 3D bodové znaky ve třech velikostních kategoriích zobrazené na mapě (2D) a virtuálním glóbu (3D). Úkolem respondentů bylo označit body z prostřední velikostní kategorie. Hypotéza, že řešení bude díky perspektivnímu zobrazení obtížnější u virtuálního glóbu, se potvrdila při hodnocení správnosti odpovědí i analýze eye-tracking metrik. Rozlišování velikosti bodového znaku bylo nad 3D stimulem (virtuálním glóblem) pomalejší a současně respondenti mnohem chybovali více než v případě zobrazení znaků nad 2D mapou.

Výsledky experimentů zaměřených na tematické 3D mapy (viz kapitola 7) jsou:

11. U prostorového kartogramu byla správnost odpovědí vyšší, nicméně respondenti potřebovali k řešení úkolu větší množství času
12. Použití stínovaného kartogramu není výhodné
13. Vizualizace bodových znaků nad virtuálním glóblem není výhodná – respondenti byli pomalejší a více chybovali než v případě mapy

Výsledky druhého dílčího cíle již byly publikovány v následujících titulech:

- **Popelka, S., Brychtová, A.** (2013): Eye-tracking Study on Different Perception of 2D and 3D Terrain Visualisation. *The Cartographic Journal*, Vol. 50 No. 3, Maney Publishing, s. 240-246.
- **Popelka, S., Brychtová, A.** (2013): Eye-tracking experiment on 3D thematic maps. *AGILE 2013 Workshop - Analysing eye-tracking data in real, virtual and mixed environments*, Leuven University, 2 s.
- **Popelka, S.** (2014): The Role of Hill-Shading in Tourist Maps. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (ET4S 2014)*, CEUR-WS, 5 s.
- **Popelka, S., Dedkova, P.** (2014): Extinct Village 3D Visualization and its Evaluation with Eye-Movement Recording. *ICCSA 2014 - Lecture Notes in Computer Science Volume 8579*, Springer International Publishing, 10 s.
- **Popelka, S., Brus, J., Dědková, P.** (2013): 3D Visualization of Extinct Village and its Evaluation using Eye-tracking. *Proceedings of the 12 th SEASC: Geospatial Cooperation Towards a Sustainable Future ASEAN FLAG*, 6 s.
- **Popelka, S., Dolezalova, J.** (2015): Non-photorealistic 3D Visualization in City Maps: An Eye-Tracking Study. *Modern Trends in Cartography*, Springer International Publishing, s. 357-367.

DC 3 – Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii

Výsledkem třetího dílčího cíle jsou sady doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii. Doporučení byla vytvářena jak pro samotné eye-tracking testování, tak pro analýzu eye-tracking dat.

V první části (podkapitola 8.1) jsou shrnuty poznatky zjištěné při realizaci eye-tracking experimentů v DC 2 a dalších autorových studiích. Doporučení jsou zaměřena především na správnou tvorbu testovacích stimulů a korektní nastavení experimentu. Zmíněna jsou rovněž doporučení pro volbu experiment-designu a počtu respondentů.

Druhá část doporučení (podkapitola 8.2) se týká analýzy naměřených dat. Doporučení jsou zaměřena na klasifikaci dat na fixace a sádky a správné použití metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat popsanych v DC 1.

Výsledky třetího dílčího cíle (viz kapitola 8) jsou:

1. Sada čtrnácti doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu
2. Sada čtrnácti doporučení pro analýzu eye-tracking dat v kartografickém výzkumu

Výsledky třetího dílčího cíle již byly publikovány v následujících titulech:

- **Popelka, S., Brychtová, A., Brus, J.** (2012): Advanced Map Optimization Based on Eye-tracking. Ed.: Carlos Bateira, *Cartography InTech*, Rieka, Croatia, 312 s.
- Brychtová, A., **Popelka, S.** (2012): Eye-tracking v kartografii. *Aktivita v kartografii Kartografická spoločnosť Slovenskej republiky*, 20-28 s.

10. DISKUZE

V rámci jednotlivých kapitol již byly diskutovány dílčí problémy, které bylo nutné vyřešit. Cílem této kapitoly je popis nejvýznamnějších z těchto problémů a zdůvodnění rozhodnutí, která autor při tvorbě disertační práce učinil.

Pravé 3D vs. 2,5D

Název disertační práce zní „Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybů očí“. Všechny eye-tracking experimenty jsou ale zaměřené na hodnocení pseudo 3D (2,5D) vizualizace, kdy je obraz promítán na plochu monitoru. I přes rychlý vývoj technologií pro zobrazení pravé 3D vizualizace (3D monitory, holografická technologie) je zobrazení na běžném monitoru stále nejčastěji využíváno. Záznam pohybu očí při sledování pravého 3D zobrazení by byl s dostupným zařízením (SMI RED 250) velmi obtížný, ne-li nemožný. Ze stejného důvodu nebylo využito screen-recording stimulů zobrazujících interaktivní práci s 3D modelem (zoomování, otáčení, atd.) Z mnoha oblastí, ve kterých je možné 3D geovizualizaci využít, byly vybrány ty oblasti, ve kterých je využití 3D map nejčastěji využíváno, a ty, kde je přínosné testovat jejich vhodnost oproti běžným 2D mapám. V práci byly vybrány tři oblasti použití 3D vizualizací – mapy reliéfu, mapy městské zástavby a tematické mapy. Jistě existují i další oblasti, ve kterých je 3D vizualizace běžně používána (např. GPS navigace, 3D plány budov a další), avšak nebylo v možnostech autora otestovat mapy ze všech těchto oblastí. Stejně tak byl každý z popsaných eye-tracking experimentů zaměřen na řešení konkrétního úkolu (např. hledání bodového znaku, hledání konkrétního vrcholu atd.). Proto bylo velmi obtížné zobecnit zjištěné výsledky pro celé téma 3D vizualizace.

Vazba na zařízení SMI RED 250

Při měření eye-tracking dat bylo využito dostupné zařízení SMI RED 250 s dodaným software. Z toho důvodu je například v podkapitole 4.2.1 „Algoritmy identifikace fixací a sakád“ popsáno nastavení identifikačních algoritmů v programu od společnosti SMI. Stejně tak při hodnocení náročnosti a rychlosti jednotlivých metod analýzy a vizualizace (podkapitola 4.3) je uvažováno, že nejméně náročné je použití metod dostupných přímo v aplikaci SMI BeGaze. Aby nebyly možnosti analýzy vázány pouze na tento komerční software, byly v práci použity i další open-source nebo volně dostupné aplikace.

Způsob hodnocení metod analýzy eye-tracking dat

Výstupem prvního dílčího cíle (kapitola 4) je hodnocení metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat a tvorba rozhodovacího schématu pro volbu nejvhodnější metody. Původně bylo uvažováno využití dotazníkového šetření pro objektivní zjištění informační hodnoty výstupů jednotlivých metod. Každá z metod je ale určena pro vizualizaci jiného typu informace a pro různá data, proto je nelze mezi sebou jednoduše porovnat. Z toho důvodu bylo v tabulce 10 pouze shrnuto, co je výstupem jednotlivých metod. Rozhodovací schéma bylo vytvořené na základě čtyř parametrů. Prvním z nich je typ naměřených dat (statická vs. dynamická). U dalších tří parametrů se analytik rozhoduje podle toho, zda chce u naměřených dat zachovat prostorovou složku, zda může být výsledek agregován pro všechny respondenty či zda je cílem studie porovnání záznamu pohybu očí jednotlivých uživatelů. Při srovnání metod z hlediska náročnosti a rychlosti použití byl zvolen expertní odhad autora. Bylo uvažováno exaktnější srovnání, jakým by u jiného typu analýz bylo například měření výpočetního času. Při použití metod pro analýzu a vizualizaci eye-

tracking dat je výpočetní čas relativně malý (v řádu sekund), nicméně metody se liší počtem nezbytných kroků při přípravě dat či složitostí nastavení metody. Z toho důvodu byly jednotlivé metody ohodnoceny pomocí hvězdiček v tabulce 12 na základě autorových zkušeností. Využití názoru dalších odborníků nebylo bohužel možné, protože zřejmě nikdo jiný nemá praktické zkušenosti s použitím všech popsaných metod.

Kombinace eye-trackingu a dalších metod studia použitelnosti

Metodu sledování pohybu očí je vhodné kombinovat s dalšími metodami použitelnosti, jako je například dotazník, rozhovor, think-aloud a další. V práci bylo několik experimentů kombinováno s jednoduchým dotazníkem zjišťujícím subjektivní názor respondenta na hodnocený typ vizualizace, případně byl po dokončení testování veden krátký rozhovor o proběhlém testu. Většina stimulů a úkolů v experimentech byla volena tak, aby byla analýza eye-tracking dat a odpovědí uživatelů dostatečná pro hodnocení použitého typu vizualizace. V práci bohužel nebyl prostor na hlubší využití dalších metod studií použitelnosti, případně na kombinaci záznamu pohybu očí například se snímáním EEG či měření odporu kůže.

Within-subject vs. between-subject

Jedním z nejzásadnějších rozhodnutí v průběhu práce byla volba mezi within-subject a between-subject designem experimentu. Při within-subject všichni respondenti vidí obě varianty (2D, 3D) stimulů v experimentu. U between-subject designu experimentu jsou respondenti rozděleni do dvou skupin a každé skupině je prezentována pouze jedna varianta stimulu. Odborná literatura se v otázce volby experiment designu rozchází a nedává jasné doporučení. V práci byl zvolen within-subject design. Tato volba proběhla na základě osobní konzultace autora s Kennethem Holmqvistem z Lund University. Kenneth Holmqvist se eye-trackingem zabývá již od roku 1991, jeho pracoviště je nejlépe vybavené v Evropě a patří mezi nejlepší na světě. Dle této konzultace by při využití between-subject designu byly výsledky více ovlivněny rozdíly mezi uživateli než vlastním typem vizualizace. Jednu z variant stimulu bylo nutné upravit, aby bylo zamezeno efektu učení. Tyto úpravy stimulů byly voleny tak, aby měly co nejmenší vliv na uživatele a bylo možné testovaný typ vizualizace (2D a 3D) porovnat. Například u experimentu 3D Cities bylo na stimulu zobrazené stejné území a byla použita stejná sada bodových znaků. Kromě typu vizualizace (2D a 3D) se stimuly lišily rozmístěním znaků v mapě. Přesto byl kladen důraz na umístění hledaného znaku u každé dvojice stimulů přibližně ve stejné vzdálenosti od středu obrázku.

Počet respondentů

Většiny ze sedmi popsaných eye-tracking experimentů se zúčastnilo 40 respondentů. Tento počet je pro eye-tracking studii dostatečný. Běžně se využívá i mnohem menšího počtu respondentů. Příkladem může být průměrný počet 17 respondentů v nejvýznamnějších kartografických eye-tracking studiích (tab. 2 na straně 18).

Rozdíl oproti tezí disertační práce

Oproti plánu představeného v rámci tezí disertační práce došlo k několika změnám. Druhý dílčí cíl byl rozdělen do tří kapitol (kapitoly 5, 6 a 7) podle oblastí využití 3D vizualizace. Místo plánovaných pěti eye-tracking experimentů jich bylo vytvořeno sedm. Jedním z plánovaných eye-tracking experimentů bylo hodnocení 3D vizualizace v interaktivním prostředí. Po úvaze bylo rozhodnuto, že tento experiment nebude realizován. Důvodem byla jak technická náročnost řešení při použití eye-trackeru SMI RED 250, tak i nesoulad s ostatními experimenty popsanými v disertační práci.

11. ZÁVĚR

Cílem disertační práce „Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybu očí“ bylo vyhodnotit vhodnost metod 3D vizualizace pomocí analýzy sedmi eye-tracking experimentů.

K dosažení cíle práce bylo nutné vybrat vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat. Autor představil soubor patnácti metod, které jsou vhodné pro kartografický výzkum. Kromě v eye-tracking výzkumu běžně využívaných způsobů analýzy a vizualizace dat byly do souboru zahrnuty i metody využívající GIS nástroje. Autor všechny metody detailně popsal, otestoval a představil jejich výsledky při analýze či vizualizaci eye-tracking dat naměřených při práci s kartografickými díly.

Výstupem první části práce je optimální nastavení identifikačního algoritmu I-DT pro klasifikaci naměřených eye-tracking dat pro kartografické účely, rozhodovací schéma a hodnocení popsaných metod dle náročnosti a rychlosti použití. Tyto výsledky napomohou dalším výzkumníkům při analýze eye-tracking experimentů pro hodnocení map.

Stěžejní částí práce byl návrh, tvorba, provedení a analýza sedmi eye-tracking experimentů ve třech případových studiích sloužících k analýze rozdílného vnímání 2D a 3D kartografické vizualizace. Jako stimuly byly použity statické obrázky obsahující 2D a 3D vizualizace ze tří tematických oblastí. Hodnocena byla vizualizace reliéfu pomocí vrstevnic, barevné hypsometrie a perspektivních pohledů, fotorealistická a nefotorealistická vizualizace městské zástavby a tematické mapy porovnávající jednoduchý, prostorový a stínovaný kartogram. Výsledkem těchto experimentů byla analýza vhodnosti map pro řešení prostorových úloh provedená pomocí metod popsaných a ohodnocených v první části práce. Naměřená data o pohybu pohledu očí byla statisticky otestována a pomocí vhodných metod vizualizována.

V poslední části práce byly vytvořeny sady doporučení pro kartografický výzkum využívající zařízení pro sledování pohybu očí. Při tvorbě doporučení byly využity zkušenosti získané během eye-tracking experimentů obsažených v disertační práci i dalších studií autora.

Potenciál analýzy pohybu očí při čtení a práci s mapou nebyl v České republice doposud využit. Katedra geoinformatiky je stále jediným kartografickým pracovištěm disponujícím eye-tracking zařízením, a i v evropském měřítku je systematický eye-tracking výzkum v kartografii ojedinělý. Díky klesající ceně profesionálních eye-trackerů a rozmachu levných zařízení je možné v blízké budoucnosti očekávat stále více eye-tracking studií zaměřených na analýzu map a kartografických děl. Hodnocení použitelnosti 3D vizualizace v kartografii bylo doposud řešeno většinou pomocí dotazníkových šetření. Existuje jen velmi málo studií, hodnotících 3D kartografickou vizualizaci pomocí eye-trackingu.

Při tvorbě disertační práce byly využity poznatky z kartografie a geoinformatiky, ale autor rovněž spolupracoval s odborníky na 3D vizualizaci, studium použitelnosti, eye-tracking a psychologii.

Disertační práce obsahuje v České republice ojedinělý ucelený soubor informací o technologii eye-trackingu, metodách analýzy a vizualizace eye-tracking dat a v neposlední řadě soubor provedených případových studií zkoumající efektivitu 3D vizualizace v kartografii. Z těchto důvodů autor věří, že jeho disertační práce usnadní kartografům počátky práce s eye-tracking zařízením, dopomůže kvalitnímu hodnocení uživatelské percepce map a také pomůže objasnit efektivitu 3D vizualizace v kartografii.

12. POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- ALACAM, Ö., DALCI, M. (2009) A usability study of WebMaps with eye tracking tool: the effects of iconic representation of information. In Human-Computer interaction. New trends. Springer, s. 12-21.
- ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N. (2013) Visual Analytics of Movement. Springer-Verlag Berlin An, 387 s.
- ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N., BURCH, M., WEISKOPF, D. (2012) Visual Analytics Methodology for Eye Movement Studies. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18(12), s. 2889-2898.
- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G. (2006) Exploratory analysis of spatial and temporal data. Springer Berlin, Germany, 704 s.
- BARLOW, D. H., HERSEN, M. (1984) Single case experimental designs. Pergamon Press New York, 416 s.
- BELL, C. (1823) On the motions of the eye, in illustration of the uses of the muscles and nerves of the orbit. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 113, s. 166-186.
- BERNABÉ-POVEDA, M. A., SÁNCHEZ-ORTEGA, I., ÇÖLTEKIN, A. (2011) Techniques for Highlighting Relief on Orthoimagery. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 21, s. 346-352.
- BIEDERT, R., BUSCHER, G., DENGEL, A. (2010) The eyebook—using eye tracking to enhance the reading experience. Informatik-Spektrum, 33(3), s. 272-281.
- 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 Proceedings of EuroVis, s.
- BLEISCH, S. (2012) 3D Geovisualization – Definition and Structures for the Assessment of Usefulness. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-2, s. 129-134.
- BLIGNAUT, P. (2009) Fixation identification: The optimum threshold for a dispersion algorithm. Attention, Perception, & Psychophysics, 71(4), s. 881-895.
- BOJKO, A. (2013) Eye tracking the user experience: A practical guide to research. Rosenfeld Media, 320 s.
- BRODERSEN, L., ANDERSEN, H. H., WEBER, S. (2002) Applying eye-movement tracking for the study of map perception and map design. National Survey and Cadastre, 98 s.
- BRYCHTOVA, A., COLTEKIN, A. (2014) An Empirical User Study for Measuring the Influence of Colour Distance and Font Size in Map Reading Using Eye Tracking. The Cartographic Journal, s. 1-11.
- BUCHROITHNER, M. F. (2012) True-3D in Cartography - Autostereoscopic and Solid Visualisation of Geodata. Berlin: Springer, 510 s.
- BUSWELL, G. T. (1935) How people look at pictures. University of Chicago Press Chicago, 198 s.
- CARD, S. K., ROBERTSON, G. G., MACKINLAY, J. D. (1991) The information visualizer, an information workspace. In Proceedings of the Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems, ACM, s. 181-186.
- CARMICHAEL, L. (1926) Sir Charles Bell: A contribution to the history of physiological psychology. Psychological Review, 33(3), s. 188.
- CARTWRIGHT, W., PETERSON, M. P. (2007) Multimedia cartography. Springer, 546 s.
- COLTEKIN, A., FABRIKANT, S., 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, 24(10), s. 1559-1575.

- COLTEKIN, 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*, 36(1), s. 5-17.
- CUTRELL, E., GUAN, Z. (2007) What are you looking for?: an eye-tracking study of information usage in web search. In *Proceedings of the Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM, s. 407-416.
- DALE, R., KIRKHAM, N. Z., RICHARDSON, D. C. (2011) The dynamics of reference and shared visual attention. *Frontiers in psychology*, 2, s.
- DĚDKOVÁ, P. (2012) 3D vizualizace zaniklé obce a její hodnocení z hlediska uživatelské kognice. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 44.
- DELABARRE, E. B. (1898) A method of recording eye-movements. *The American Journal of Psychology*, 9(4), s. 572-574.
- DENT, B. D. (1990) *Cartography: Thematic map design*. WC Brown Dubuque, IA, 417 s.
- DOBSON, M. W. (1977) The adoption of an eye movement recording technique to a cartographic experiment involving the graduated circle symbol. *University of Kansas, Geography (-Meteorology)*, 636 s.
- DODGE, R., CLINE, T. S. (1901) The angle velocity of eye movements. *Psychological Review*, 8(2), s. 145-157.
- DÖLLNER, J., BUCHHOLZ, H. (2005) Non-Photorealism in 3D Geovirtual Environments. In *Proceedings of the Proceedings of AutoCarto*, s. 1-14.
- DÖLLNER, J., BUCHHOLZ, H., NIENHAUS, M., KIRSCH, F. (2005) Illustrative visualization of 3d city models. In *Proceedings of the Electronic Imaging 2005*, International Society for Optics and Photonics, s. 42-51.
- DUŠEK, R., MIŘIJOVSKÝ, J. (2009) Vizualizace prostorových dat: chaos v dimenzích. *GEOGRAFIE – SBORNÍK ČESKÉ GEOGRAFICKÉ SPOLEČNOSTI*, 2009(3), s. 169-178.
- DYKES, J., MACEACHREN, A. M., KRAAK, M.-J. (2005) *Exploring geovisualization*. Elsevier, 710 s.
- EICHER, C., BEDEL, M., NEUFFER, D., KAPPELER, S., NEUN, M., SCHOENING, R. (2010) Smiling Cartographers: Making GIS More Usable for Cartography. *Cartographic Journal*, The, 47(2), s. 173-179.
- ELLIS, G., DIX, A. (2006) An explorative analysis of user evaluation studies in information visualisation. In *Proceedings of the Proceedings of the 2006 AVI workshop*, ACM, s. 1-7.
- ENOCH, J. M. (1959) Effect of the size of a complex display upon visual search. *JOSA*, 49(3), s. 280-285.
- FABRIKANT, S. I., HESPANHA, S. R., HEGARTY, M. (2010) Cognitively inspired and perceptually salient graphic displays for efficient spatial inference making. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(1), s. 13-29.
- FABRIKANT, S. I., REBICH-HESPANHA, S., ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G., MONTELLO, D. R. (2008) Novel method to measure inference affordance in static small-multiple map displays representing dynamic processes. *Cartographic Journal*, The, 45(3), s. 201-215.
- FITTS, P. M., JONES, R. E., MILTON, J. L. (2005) Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Ergonomics*. 3. Psychological mechanisms and models in ergonomics, 3, s. 1-6.
- FUHRMANN, S., KOMOGORTSEV, O., TAMIR, D. (2009) Investigating Hologram-Based Route Planning. *Transactions in GIS*, 13(s1), s. 177-196.
- FUCHS, S., SPACHINGER, K., DORNER, W., ROCHMAN, J., SERRHINI, K. (2009) Evaluating cartographic design in flood risk mapping. *Environmental Hazards*, 8(1), s. 52-70.
- GARLANDINI, S., FABRIKANT, S. I. (2009) Evaluating the effectiveness and efficiency of visual variables for geographic information visualization. In *Spatial Information Theory*. Springer, s. 195-211.

- GEOCACHING.CZ. (2015) Geocaching.cz [online]. Dostupné na: <http://www.geocaching.cz/topic/25081-mapycz-turistická-mapa-se-stínováním/>.
- GLENSTRUP, A. J., ENGELL-NIELSEN, T. (1995) Eye controlled media: Present and future state. 83 s.
- GOLDBERG, J., HELFMAN, J. (2011) Eye tracking for visualization evaluation: Reading values on linear versus radial graphs. *Information Visualization*, 10(3), s. 182-195.
- GOLDBERG, J. H., KOTVAL, X. P. (1999) Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(6), s. 631-645.
- GOLDBERG, J. H., STIMSON, M. J., LEWENSTEIN, M., SCOTT, N., WICHANSKY, A. M. (2002) Eye tracking in web search tasks: design implications. In *Proceedings of the Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications*, ACM, s. 51-58.
- GOOGLE. (2015) Styled Maps Wizard [online]. Dostupné na: <http://gmaps-samples-v3.googlecode.com/svn/trunk/styledmaps/wizard/index.html>.
- GÓRALSKI, R. (2009) Three-dimensional interactive maps. University of Glamorgan, 313 s.
- GUIDI, G., FRISCHER, B., LUCENTI, I. (2007) Rome Reborn-Virtualizing the ancient imperial Rome. In *Proceedings of the Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, s. 1-4.
- HABER, R. B., MCNABB, D. A. (1990) Visualization idioms: A conceptual model for scientific visualization systems. *Visualization in scientific computing*, 74, s. 93.
- HAEBERLING, C. (2002) 3D Map Presentation–A Systematic Evaluation of Important Graphic Aspects. In *Proceedings of the ICA Mountain Cartography Workshop" Mount Hood"*, s. 1-11.
- HAEBERLING, C. (2003) Topografische 3D-Karten-Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze. ETH Zürich, 167 s.
- HAEBERLING, C. (2005) Cartographic design principles for 3D maps–A contribution to cartographic theory. In *Proceedings of the 22nd International Cartographic Conference, Caruña, Spain*, s. 1-6.
- HÄGERSTRAAND, T. (1970) What about people in regional science? *Papers in regional science*, 24(1), s. 7-24.
- HAKLAY, M., ZAFIRI, A. (2007) Usability engineering for GIS-learning from a snapshot, s. 87-97.
- HAMMOUD, R. I., MULLIGAN, J. B. (2008) Introduction to Eye Monitoring. In *Passive Eye Monitoring*. Springer, s. 1-19.
- HANZELKA, J. (2013) Typologie uživatelů map na základě eye-tracking systému. Olomouc, Univerzita Palackého s. 53.
- HARRIS, C. M., HAINLINE, L., ABRAMOV, I., LEMERISE, E., CAMENZULI, C. (1988) The distribution of fixation durations in infants and naive adults. *Vision Research*, 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.
- HAVRE, S., HETZLER, E., WHITNEY, P., NOWELL, L. (2002) Themeriver: Visualizing thematic changes in large document collections. *Visualization and Computer Graphics*, IEEE Transactions on, 8(1), s. 9-20.
- HERINK, J., KASTNER, J. (2004) Školní atlas České republiky. Kartografie Praha.
- HERMAN, L. (2014) Vizualizace 3D modelů měst na webu. Brno, Masarykova univerzita s. 146.
- HERMANS, O., LAARNI, J. (2003) Searching Information from Screen Maps. In *Proceedings of the ScanGIS*, s. 143-156.

- HOFFMAN, D. D. (2000) *Visual intelligence: How we create what we see*. WW Norton & Company, 320 s.
- 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 University Press, 537 s.
- HUB, M., ZATLOUKAL, M. (2008) Methodology of fuzzy usability evaluation of Information systems in Public administration. *WSEAS Transactions on Information Science & Applications*, 5(11), s. 1573-1583.
- IMHOF, E. (2007) *Cartographic relief presentation*. ESRI, Inc., 388 s.
- INCOUL, A. (2013) *Vergelijken van papieren en digitale topografische kaarten aan de hand van eye tracking*. Gent, Belgium, Ghent University s.
- IRVANKOSKI, K. (2012) *Visualization of Elevation Information on Maps: an Eye Movement Study*. Helsinki, University of Helsinki s. 25.
- IRWIN, D. E. (1992) Visual memory within and across fixations. In *Eye movements and visual cognition*. Springer, s. 146-165.
- ISO (1998) 9241-11. Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs). The international organization for standardization, s.
- IWASAKI, M., INOMATA, H. (1986) Relation between superficial capillaries and foveal structures in the human retina. *Investigative ophthalmology & visual science*, 27(12), s. 1698-1705.
- JACOB, R. J., KARN, K. S. (2003) Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. *Mind*, 2(3), s. 4.
- JARODZKA, H., HOLMQVIST, K., NYSTRÖM, M. (2010) A vector-based, multidimensional scanpath similarity measure. In *Proceedings of the Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, ACM, s. 211-218.
- JEDLIČKA, K., ČADA, V., FIALA, R., HÁJEK, P., JANEČKA, K., JEŽEK, J., ROUBÍNEK, J., STREJCOVÁ, J., VICHROVÁ, M. (2013) Techniques Used for Optimizing 3D Geovisualization of Terežín Memorial. In *Proceedings of the 26th International Cartographic Conference*, Dresden, s. 1-12.
- JELÉNEK, J. (2010) *3D rekonstrukce krajiny na příkladu zaniklých obcí v českém pohraničí a vojenských újezdech*. Praha, Univerzita Karlova v Praze s. 46.
- JENKS, G. F. (1970) Conceptual and perceptual error in thematic mapping. In *Proceedings of the Proceedings of ACSM*, s. 174-188.
- JENKS, G. F., CASPALL, F. C. (1971) Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2), s. 217-244.
- JOBST, M., GERMANCHIS, T. (2007) The employment of 3D in cartography—An overview. In *Multimedia Cartography*. Springer, s. 217-228.
- JUST, M. A., CARPENTER, P. A. (1976) Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), s. 441-480.
- KAŇOK, J. (1999) *Tematická kartografie*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 318 s.
- KENNELLY, P. J., STEWART, A. J. (2014) General sky models for illuminating terrains. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(2), s. 383-406.
- KIEFER, P., STRAUB, F., RAUBAL, M. (2012) Location-aware mobile eye tracking for the explanation of wayfinding behavior. In *Proceedings of the Proceedings of the AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science*, s. 5.
- KNAPP, L. (1995) A task analysis approach to the visualization of geographic data. In *Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction for Geographic Information Systems*. Springer, s. 355-371.
- KOMÁRKOVÁ, J. (2007) *Kvalita webových geografických informačních systémů*. 127 s.

- KOMOGORTSEV, O. V., JAYARATHNA, S., KOH, D. H., GOWDA, S. M. (2010) Qualitative and quantitative scoring and evaluation of the eye movement classification algorithms. In Proceedings of the Symposium on Eye-Tracking Research & Applications, ACM, s. 65-68.
- KONEČNÝ, M., BŘEZINOVÁ, Š., DRÁPELA, M. V., FRIEDMANNOVÁ, L., HERMAN, L., HÜBNEROVÁ, Z., KOLÁŘ, M., KOLEJKA, J., KOZEL, J., KUBÍČEK, P. (2011) Dynamická geovizualizace v krizovém managementu. Masarykova univerzita, 385 s.
- KOUČKÁ, L. (2011) 3D rekonstrukce zaniklých částí města Dobříš. Praha, Univerzita Karlova v Praze s. 49.
- KOUTSOUDIS, A., ARNAOUTOGLU, F., CHAMZAS, C. (2007) On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), s. 26-31.
- KOZÁKOVÁ, M., VOŽENÍLEK, V. (2009) Tematická informace na tyflomapách. *Kartografické listy*, s. 86-92.
- KRAAK, M.-J., ORMELING, F. (2011) *Cartography: visualization of spatial data*. Guilford Press, 205 s.
- KRAAK, M. (1988) *Computer-assisted cartographical 3D imaging techniques*. Delft University Press s. 175.
- KRAAK, M. J. (2008) Geovisualization and time–new opportunities for the space–time cube. *Geographic visualization: concepts, tools and applications*, s. 293-306.
- KRASSANAKIS, V., LELLI, A., LOKKA, I.-E., FILIPPAKOPOULOU, V., NAKOS, B. (2013) Searching for salient locations in topographic maps. In Proceedings of the SAGA 2013, s. 41-44.
- KUBÍČEK, P., KOZEL, J. (2010) Cartographic techniques for adaptive emergency mapping. *Risk models and applications Lecture Notes in Information Science*, s. 49-62.
- KUBÍČEK, P., ŠAŠINKA, Č. (2011) Thematic uncertainty visualization usability–comparison of basic methods. *Annals of GIS*, 17(4), s. 253-263.
- KUČERA, M. (2014) Využití open-source nástrojů pro přípravu. průběh a vyhodnocení eye-tracking experimentů. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 57.
- LI, X., ÇÖLTEKIN, A., KRAAK, M.-J. (2010) Visual exploration of eye movement data using the space-time-cube. In *Geographic Information Science*. Springer, s. 295-309.
- MACEACHREN, A. M. (2004) *How maps work: representation, visualization, and design*. Guilford Press, 513 s.
- MANNAN, S., RUDDOCK, K., WOODING, D. (1995) Automatic control of saccadic eye movements made in visual inspection of briefly presented 2-D images. *Spatial vision*, 9(3), s. 363-386.
- MANOR, B. R., GORDON, E. (2003) Defining the temporal threshold for ocular fixation in free-viewing visuocognitive tasks. *Journal of Neuroscience Methods*, 128(1), s. 85-93.
- MCCONKIE, G. W. (1981) Evaluating and reporting data quality in eye movement research. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 13(2), s. 97-106.
- MEDYCKYJ-SCOTT, D., HEARNSHAW, H. M. (1993) *Human factors in geographical information systems*. Halsted Press, 266 s.
- MOHAMED, A. O., DA SILVA, M. P., COURBOULAY, V. (2007) A history of eye gaze tracking. *Rapport Interne*, s. 1-17.
- MONTELLO, D. R. (2002) Cognitive map-design research in the twentieth century: Theoretical and empirical approaches. *Cartography and Geographic Information Science*, 29(3), s. 283-304.
- NEVELSTEEN, K. (2013) Attention allocation of traffic environments of international visitors during virtual city walks. In Proceedings of the ET4S 2013, Leuven, Belgium, s. 1-6.
- NIELSEN, J. (2012) Usability 101: Introduction to usability [online]. Dostupné na: <http://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>.

- NIELSEN, J., PERNICE, K. (2010) Eyetracking web usability. New Riders, 456 s.
- NIVALA, A.-M., BREWSTER, S., SARJAKOSKI, T. L. (2008) Usability evaluation of web mapping sites. *Cartographic Journal*, The, 45(2), s. 129-138.
- NOSSUM, A. S., OPACH, T. (2011) Innovative analysis methods for eye-tracking data from dynamic, interactive and multi-component maps and interfaces. In *Proceedings of the ICC2011*, s. 1-2.
- OLSON, J. M. (1979) Cognitive cartographic experimentation. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 16(1), s. 34-44.
- OOMS, K., ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N., DE MAEYER, P., FACK, V. (2012a) Analysing the spatial dimension of eye movement data using a visual analytic approach. *Expert Systems with Applications*, 39(1), s. 1324-1332.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V. (2010) Analyzing eye movement patterns to improve map design, s.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V. (2011) Can experts interpret a map's content more efficiently? In *Proceedings of the ICC 2011*, s. 1-4.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V. (2014) Study of the attentive behavior of novice and expert map users using eye tracking. *Cartography and Geographic Information Science*, 41(1), s. 37-54.
- 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. *Cartographic Journal*, The, 49(3), s. 234-246.
- OPACH, T., NOSSUM, A. (2011) Evaluating the usability of cartographic animations with eye-movement analysis. In *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference*, Paris, s. 1-11.
- OTEVŘELOVÁ, A. (2014) Eye tracking vyhodnocení salience a interaktivní práce ve vizuálních programovacích jazycích. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 56.
- PAVELKA, F., KLÍMEK, P. (2000) Aplikovaná statistika. Vysoké učení technické, Fakulta managementu a ekonomiky ve Zlíně, 131 s.
- PETCHENIK, B. B. (1977) Cognition in cartography. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 14(1), s. 117-128.
- PETRENKO, A. (2011) Visualization of suspension patterns in human movement Wagenigen, Netherlands, Wagenigen University s. 55.
- PETROVIČ, D., MAŠERA, P. (2004) Analysis of user's response on 3D cartographic presentations. In *Proceedings of the 7th meeting of the ICA Commission on Mountain Cartography*, s. 1-10.
- POOLE, A., BALL, L. J. (2005) Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Current status and future. In *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Pennsylvania: Idea Group, s. 1-13.
- PEPELKA, S., BRYCHTOVÁ, A., VOŽENÍLEK, V. (2012) Eye-tracking a jeho využití při hodnocení map. *Geografický časopis SAV*, 64(1), s. 71-87.
- PEPELKA, S., DVORSKY, J., BRYCHTOVA, A., HANZELKA, J. (2013) User Typology Based on Eye-movement Paths. In *Proceedings of the SGEM 2013*, s. 1041-1048.
- PEPELKA, S., VAVRA, A., NETEK, R., PECHANEC, V. (2014) E-Learning Portal Functionality Assessment With the use of Eye--Tracking Experiment. In *Proceedings of the 9th International Conference on e-Learning: ICEL 2014*, Valparaiso, Chile, Academic Conferences Limited, s. 228-237.
- PEPELKA, S., VOZENILEK, V. (2013) Specifying of Requirements for Spatio-Temporal Data in Map by Eye-Tracking and Space-Time-Cube. In Z. ZHU ed. *International Conference on Graphic and Image Processing*. Bellingham: Spie Digital Library, vol. 8768, s. 1-5.
- PORATHE, T. (2007) User-centered map design. In *Proceedings of the Usability professionals' association conference*, s. 1-9.

- PRIVITERA, C. M., STARK, L. W. (2000) Algorithms for defining visual regions-of-interest: Comparison with eye fixations. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(9), s. 970-982.
- PUTTO, K., KETTUNEN, P., TORNIAINEN, J., KRAUSE, C. M., TIINA SARJAKOSKI, L. (2014) Effects of cartographic elevation visualizations and map-reading tasks on eye movements. *The Cartographic Journal*, s. 225-236.
- RAIHA, K.-J., AULA, A., MAJARANTA, P., RANTALA, H., KOIVUNEN, K. (2005) Static visualization of temporal eye-tracking data. In *Human-Computer Interaction-INTERACT 2005*. Springer, s. 946-949.
- RANDOM.ORG. (2015) Random Integer Generator [online]. Dostupné na: <https://www.random.org/integers/>.
- RASE, W.-D. (2007) Visualization of Cartographic Surfaces Using 3D Printing and Subsurface Engraving, s. 1-5.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S., GIRARDI, S., RIZZI, A., BENEDETTI, S., GONZO, L. (2009) 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures-The "3D-ARCH" Project. In *Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH*, s. 1-9.
- ROBINSON, A. H., MORRISON, J., MUEHRCKE, P., KIMERLING, A., GUPTILL, S. (1995) *Elements of Cartography*. New York: John Wiley&Sons, 688 s.
- ROBINSON, A. H., PETCHENIK, B. B. (1976) *The nature of maps: Essays toward understanding maps and mapping*. Chicago: University of Chicago Press, 138 s.
- 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*, ACM, s. 71-78.
- SANDVIK, B. (2011) Thematic Mapping [online]. Dostupné na: <http://thematicmapping.org/engine/>.
- SAUTER, D., MARTIN, B., DI RENZO, N., VOMSCHEID, C. (1991) Analysis of eye tracking movements using innovations generated by a Kalman filter. *Medical and biological Engineering and Computing*, 29(1), s. 63-69.
- SAVAGE, D. M., WIEBE, E. N., DEVINE, H. A. (2004) Performance of 2d versus 3d topographic representations for different task types. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications, s. 1793-1797.
- SEMMO, A., TRAPP, M., KYPRIANIDIS, J. E., DÖLLNER, J. (2012) Interactive Visualization of Generalized Virtual 3D City Models using Level-of-Abstraction Transitions. In *Proceedings of the Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library, s. 885-894.
- SEZNAM.CZ. (2015) Mapy.cz [online]. Dostupné na: <http://www.mapy.cz/>.
- SHEPHERD, I. D. (2008) Travails in the third dimension: a critical evaluation of three-dimensional geographical visualization. In M. DODGE, M. MCDERBY, M. TURNER eds. *Geographic visualization: concepts, tools and applications*. Wiley, s. 199-222.
- SCHOBESBERGER, D., PATTERSON, T. (2007) Evaluating the Effectiveness of 2D vs. 3D Trailhead Maps. *Mountain Mapping and Visualisation*, s. 201.
- SIEBER, R., HURNI, L. (2014) *Atlas der Schweiz* [online]. Dostupné na: <http://www.atlasderschweiz.ch/en/>.
- SIEBER, R., SCHNÜRER, R., EICHENBERGER, R., HURNI, L. (2013) The Power of 3D Real-Time Visualization in Atlases—Concepts, Techniques and Implementation. In *Proceedings of the ICC2013, Dresden, Germany*, s. 1-16.
- SLOCUM, T. A., BLOK, C., JIANG, B., KOUSSOULAKOU, A., MONTELLO, D. R., FUHRMANN, S., HEDLEY, N. R. (2001) Cognitive and usability issues in geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 28(1), s. 61-75.
- SLOCUM, T. A., MCMASTER, R. B., KESSLER, F. C., HOWARD, H. H. (2009) *Thematic cartography and geovisualization*. Prentice Hall 576 s.

- STEINKE, T. R. (1987) Eye movement studies in cartography and related fields. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 24(2), s. 40-73.
- STEWART, J., KENNELLY, P. J. (2010) Illuminated choropleth maps. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(3), s. 513-534.
- SVATONOVA, H., RYBANSKY, M. (2014) Children observe the Digital Earth from above: How they read aerial and satellite images. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, s. 6.
- TOBLER, W. R. (1973) Choropleth maps without class intervals? *Geographical analysis*, 5(3), s. 262-265.
- UPSON, C., FAULHABER JR, T. A., KAMINS, D., LAIDLAW, D., SCHLEGEL, D., VROOM, J., GURWITZ, R., VAN DAM, A. (1989) The application visualization system: A computational environment for scientific visualization. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 9(4), s. 30-42.
- 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*, 50(8), s. 614-619.
- VAN ELZAKKER, C. P. (2004) The use of maps in the exploration of geographic data. *Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 206 s.
- VAN SOMEREN, M. W., BARNARD, Y. F., SANDBERG, J. A. (1994) *The think aloud method: A practical guide to modelling cognitive processes*. Academic Press London.
- VFFÚ. (1948) *Výcvik boje o osadu a v osadě, Vojenský filmový a fotografický ústav*.
- VOŽENÍLEK, V. (2005) *Cartography for GIS: Geovisualization and Map Communication*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 142 s.
- WADE, N. J., TATLER, B. W. (2005) *The moving tablet of the eye: The origins of modern eye movement research*. Oxford University Press, 312 s.
- WACHOWICZ, M., HUNTER, G. (2002) Special Issue of Spatial Data Usability. *Data Science Journal CODATA*, s.
- WARE, C. (2010) *Visual thinking: For design*. Morgan Kaufmann, 256 s.
- WOLFF, M., ASCHE, H. (2009) A 3D Geovisualization Approach to Crime Mapping. In *Proceedings of ICC2009*, s. 1-7.
- WOOD, J., FISHER, P., DYKES, J., UNWIN, D., STYNES, K. (1999) The use of the landscape metaphor in understanding population data. *Environment and Planning B*, 26, s. 281-296.
- WOOD, J., KIRSCHENBAUER, S., DÖLLNER, J., LOPES, A., BODUM, L. (2005) Using 3D in visualization. In J. DYKES ed. *Exploring Geovisualization*. Elsevier, s. 295-312.
- YARBUS, A. L., HAIGH, B., RIGSS, L. A. (1967) *Eye movements and vision*. Plenum press New York, 222 s.
- ZEBEDIN, L., KLAUS, A., GRUBER-GEYMAYER, B., KARNER, K. (2006) Towards 3D map generation from digital aerial images. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 60(6), s. 413-427.
- ZIEGLEROVÁ, J. (2012) *Vybrané aspekty uživatelského vnímání kartografických děl*. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 35.
- ZSOLDI, K. (2011) 3D methods in cartography. In *Proceedings of the IAMG 2011 Conference*, s. 1471-1478.

SUMMARY

The aim of the thesis "Evaluation of 3D visualization in GIS using eye-tracking" was to evaluate 3D visualization using analyses of seven eye-tracking experiments.

To achieve the objective of this work, selection of appropriate methods of analysis and visualization of eye-tracking data was necessary. The author presented a set of fifteen methods suitable for cartographic research. In addition to the common eye-tracking analysis and visualization methods, the set also contains the methods from the field of GIS. All methods were described in detail, tested, and their results were presented during analyses of eye-tracking data measured on the stimuli with cartographic works.

The output of the first part of the dissertation is the optimal setting for the identification algorithm I-DT for cartographic purposes, decision tree for the selection of the best suitable method and the assessment of described methods in terms of the difficulty of the method and the speed of its use.

Crucial part of the dissertation was design, creation, and analysis of seven eye-tracking experiments. These experiments were used in three case studies aimed at analyses of the difference in the perception of 2D and 3D cartographic visualization. As stimuli, static images containing 2D and 3D visualization from three thematic areas were used. Relief visualization with the use of contour lines, hypsometry and perspective views was evaluated, as well as photorealistic and non-photorealistic urban maps. The last two experiments were focused on the comparison of simple choropleth map, prism map, and shaded choropleth map. The result of these experiments was the analysis of the suitability of the maps for solving spatial tasks. Eye-tracking data were statistically tested, visualised and analysed with the use of methods described and evaluated in the first part of the thesis.

In the last part of the thesis, sets of recommendations for cartographic eye-tracking research were created. Recommendations were formulated according to experiences gained during eye-tracking experiments described in the thesis and other studies of the author.

Analysis of eye movements during reading and working with the map was not used in the Czech Republic before. Department of Geoinformatics at Palacký University is still the only Czech cartographic department using eye-tracking devices, and even in European scale, systematic eye-tracking research in cartography is rare. With the decreasing cost of professional eye-trackers and boom of low-cost eye-trackers, more cartographic eye-tracking studies are expected in the near future. Eye-tracking evaluation of 3D visualization in cartography has so far been mostly solved by using of questionnaire surveys. There are very few studies evaluating 3D cartographic visualization with the use of eye-tracking.

Knowledge from Cartography and Geoinformatics was used during the creation of the dissertation, but the author also collaborated with experts in 3D visualization, usability studies, eye-tracking and psychology.

This thesis consists unique, comprehensive set of information about eye-tracking technology, methods of analysis and visualization of cartographic eye-tracking data. Crucial part of the thesis is a set of case studies examining the effectiveness of 3D visualization in cartography. For these reasons, author believes that his Ph.D. thesis will facilitate the beginnings of cartographers work with eye-tracking devices, will help to assessment of the user perception of maps and will also help to clarify the effectiveness of 3D visualization in cartography.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

Příloha 1	Ukázka stimulů experimentu DualMap
Příloha 2	Ukázka stimulů experimentu SingleMap
Příloha 3	Ukázka stimulů experimentu Shading – Mapy.cz
Příloha 4	Ukázka stimulů experimentu Extinct Village
Příloha 5	Ukázka stimulů experimentu 3D Cities
Příloha 6	Ukázka stimulů experimentu 3D Thematic – Areal
Příloha 7	Ukázka stimulů experimentu 3D Thematic – Points

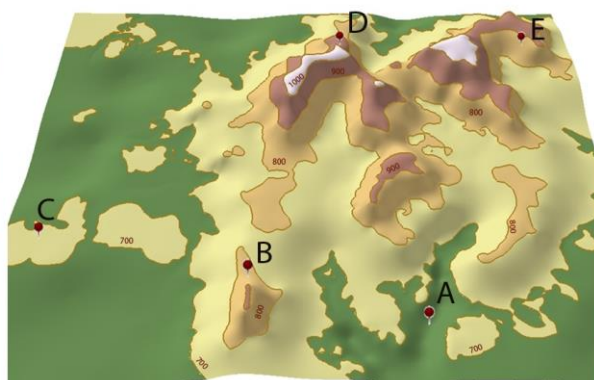
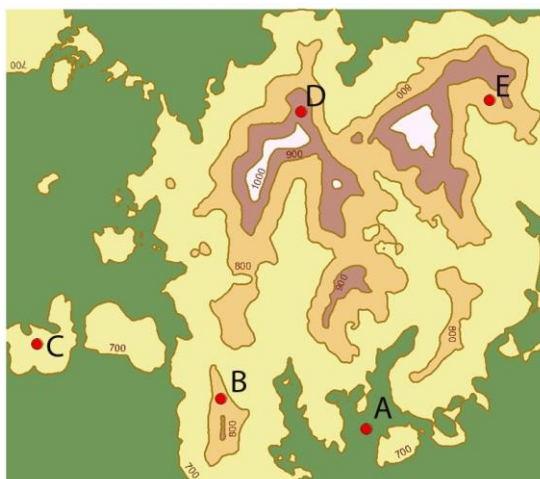
Volné přílohy:

2 x DVD

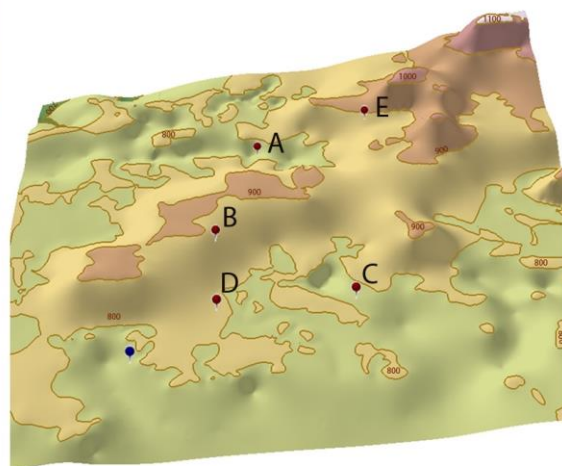
Struktura DVD:

1. Eye-tracking experiment „DualMap“ (DVD 1)
 - 1.1. Složka s obrázky stimulů
 - 1.2. Projekt programu BeGaze
 - 1.3. Projekt programu OGAMA
 - 1.4. Projekt programu V-Analytics
2. Eye-tracking experiment „SingleMap“ (DVD 1)
 - 2.1. Složka s obrázky stimulů
 - 2.2. Projekt programu BeGaze
 - 2.3. Projekt programu OGAMA
 - 2.4. Projekt programu V-Analytics
3. Eye-tracking experiment „Shading – Mapy.cz“ a „3D Cities“ (DVD 1)
 - 3.1. Složka s obrázky stimulů
 - 3.2. Projekt programu BeGaze
 - 3.3. Projekt programu OGAMA
 - 3.4. Projekt programu V-Analytics
4. Eye-tracking experiment „Extinct Village“ (DVD 1)
 - 4.1. Složka s obrázky stimulů
 - 4.2. Projekt programu BeGaze
 - 4.3. Projekt programu OGAMA
 - 4.4. Projekt programu V-Analytics
5. Eye-tracking experiment „3D Thematic – Areal“ a „3D Thematic – Points“ (DVD 2)
 - 5.1. Složka s obrázky stimulů
 - 5.2. Projekt programu BeGaze
 - 5.3. Projekt programu OGAMA
6. Text disertační práce (DVD 1 i 2)

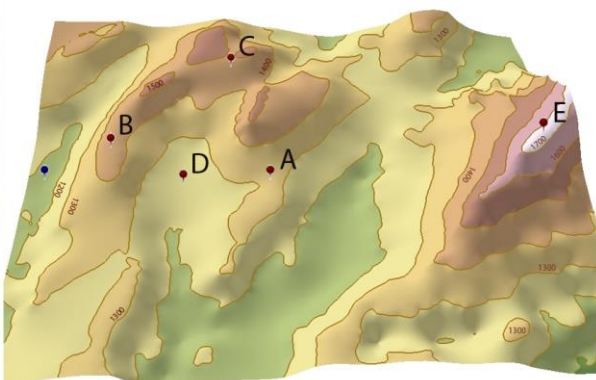
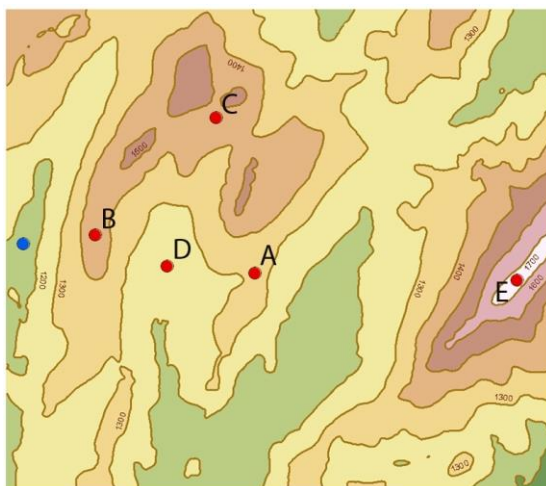
Příloha 1 Ukázka stimulů experimentu DualMap



Stimulus 4 experimentu DualMap. Otázka: Který z červených bodů je nejvyšší?

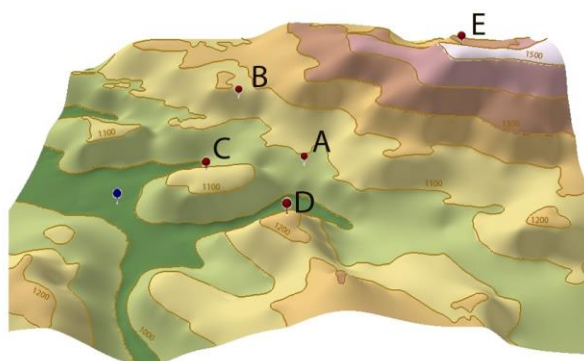
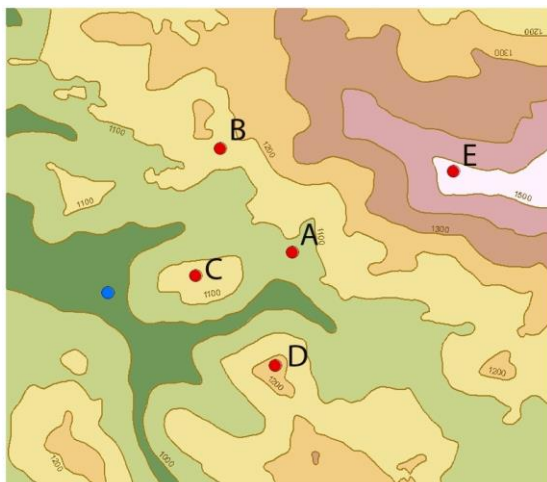


Stimulus 5 experimentu DualMap. Otázka: Který červený bod je nejvzdálenější od modrého bodu?

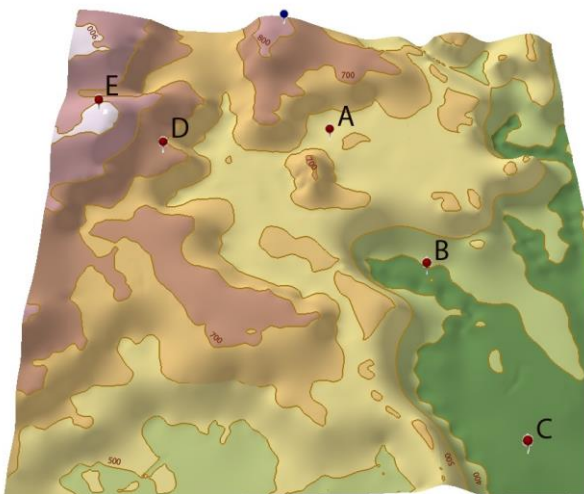
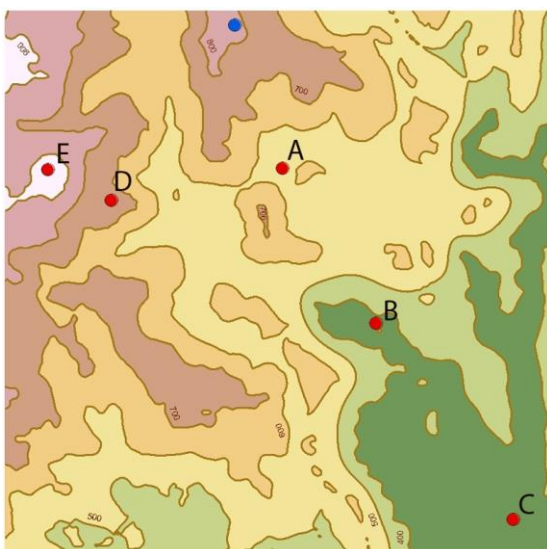


Stimulus 6 experimentu DualMap. Otázka: Ze kterého červeného bodu je možné vidět modrý bod a všechny ostatní body?

Příloha 1 Ukázka stimulů experimentu DualMap

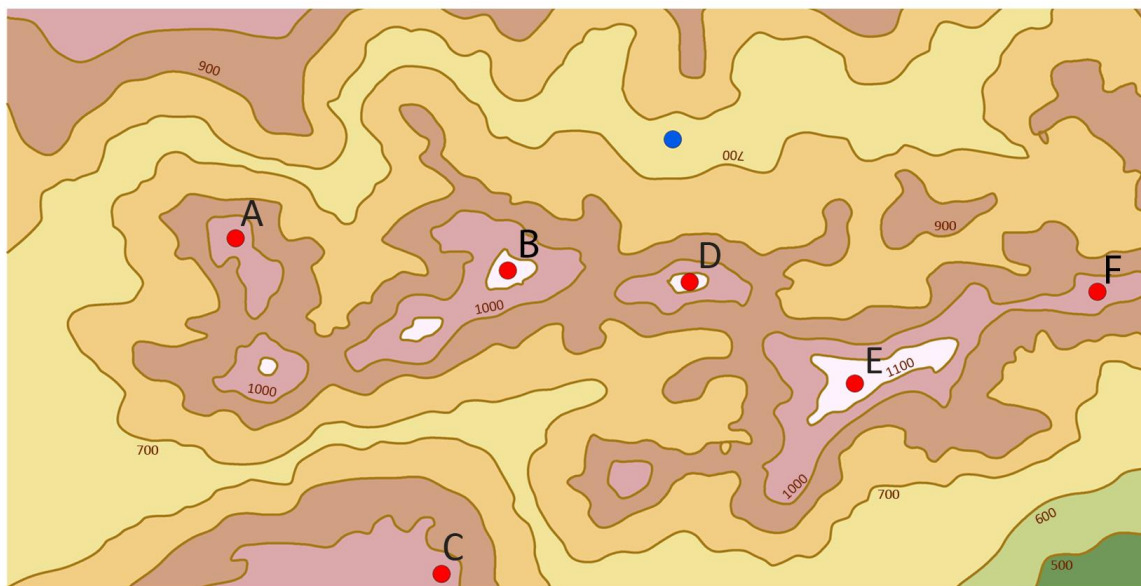


Stimulus 7 experimentu DualMap. Otázka: *Ve kterém z červených bodů můžeme postavit skládku tak, aby nebyla vidět z modrého bodu?*

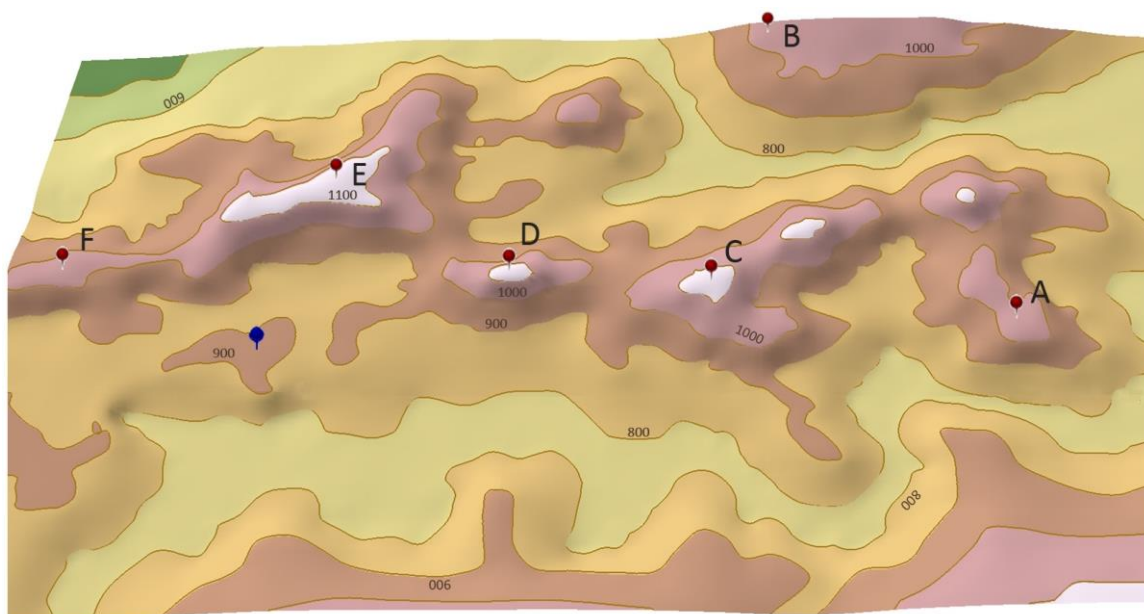


Stimulus 8 experimentu DualMap. Otázka: *Pokud v modrém bodě pustíme na zem míč, ke kterému červenému bodu se zakutálí?*

Příloha 2 Ukázka stimulů experimentu SingleMap

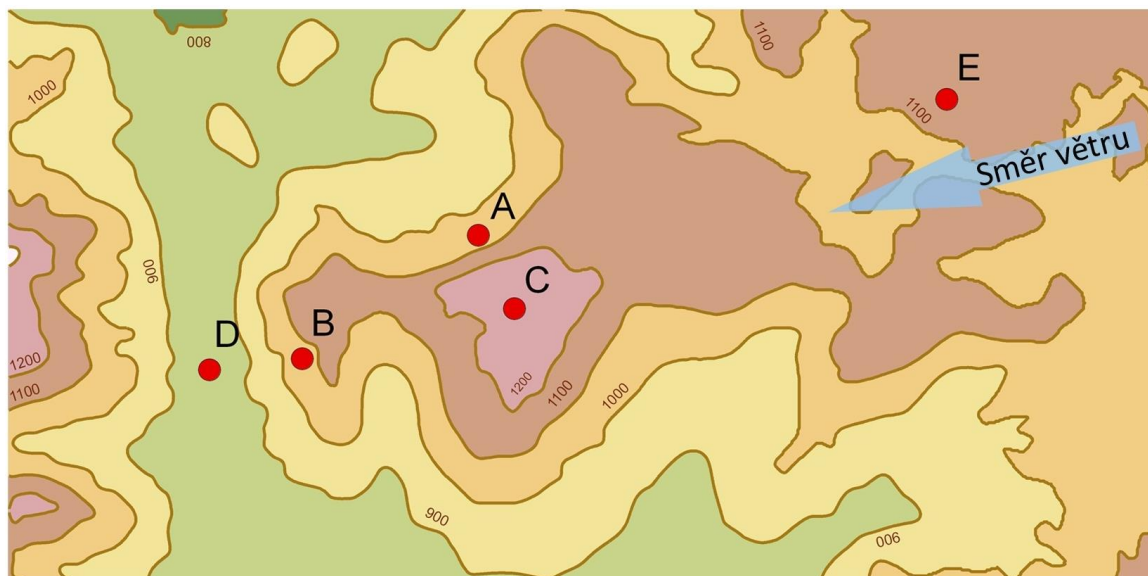


Stimulus 1 experimentu SingleMap. Úkol: Označte všechny červené body, ze kterých je možné vidět modrý bod.

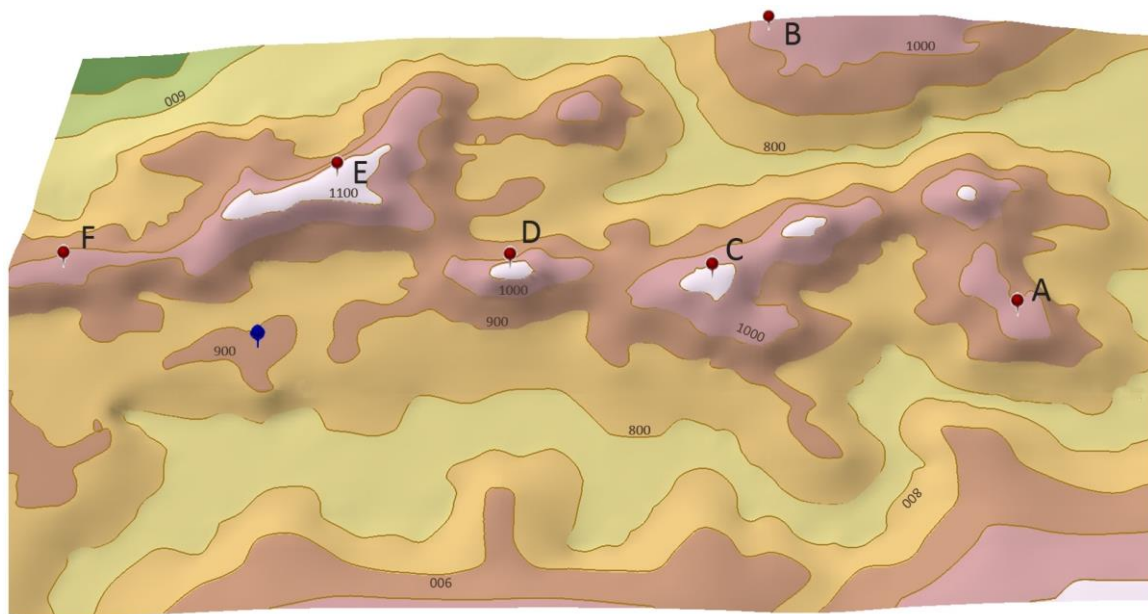


Stimulus 2 experimentu SingleMap. Úkol: Označte všechny červené body, ze kterých je možné vidět modrý bod.

Příloha 2 Ukázka stimulů experimentu SingleMap

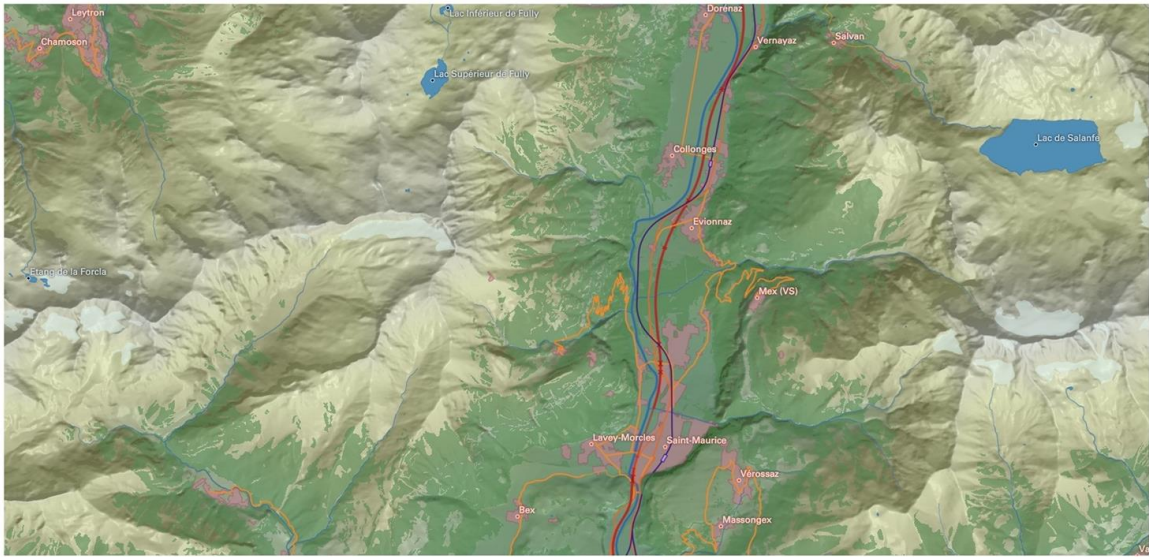


Stimulus 3 experimentu SingleMap. Úkol: Označte všechny červené body, které jsou chráněné před větrem.

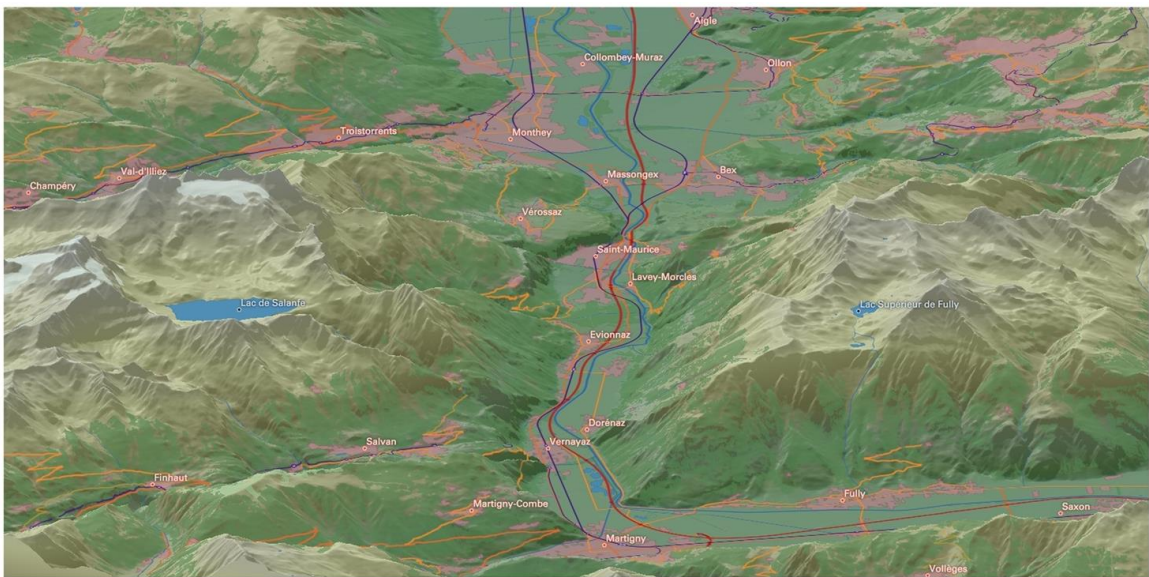


Stimulus 4 experimentu SingleMap. Úkol: Označte všechny červené body, které jsou chráněné před větrem.

Příloha 2 Ukázka stimulů experimentu SingleMap

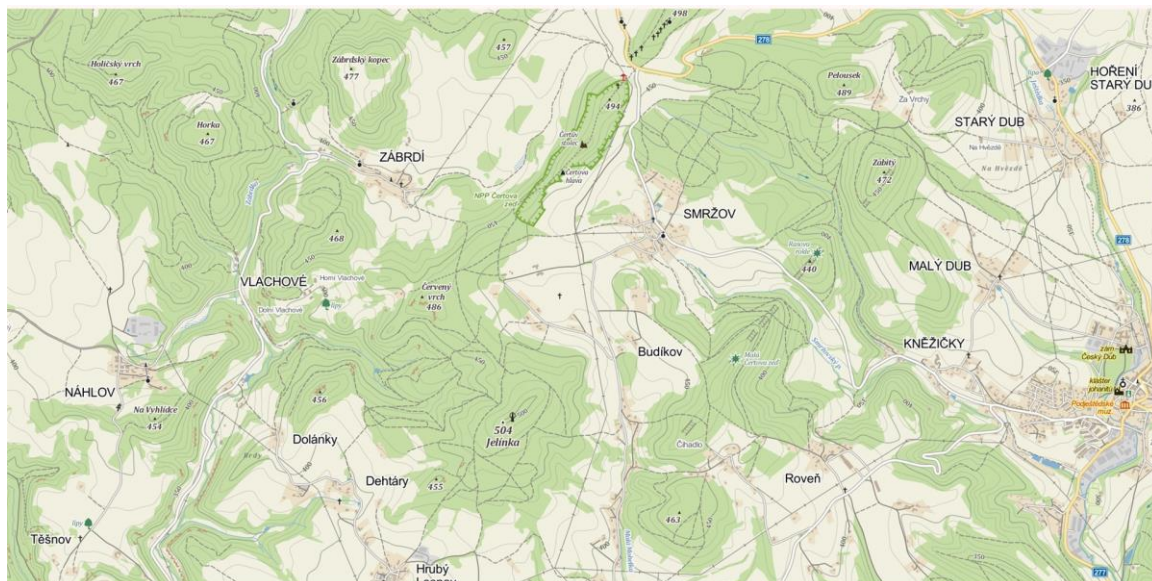


Stimulus 11 experimentu SingleMap. Úkol: *Najděte a označte nejvyšší vrchol.*

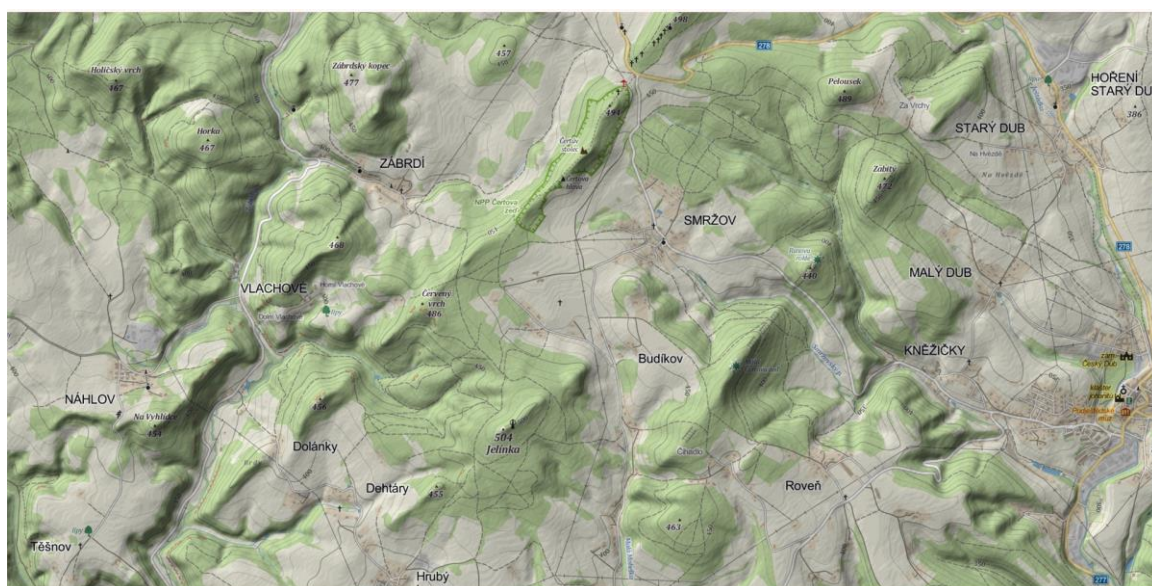


Stimulus 12 experimentu SingleMap. Úkol: *Najděte a označte nejvyšší vrchol.*

Příloha 3 Ukázka stimulů experimentu Shading – Mapy.cz



Stimulus 13a (Trial 3) experimentu Shading – Mapy.cz. Úkol: *Najděte a myší označte vrchol „Pelousek“.*

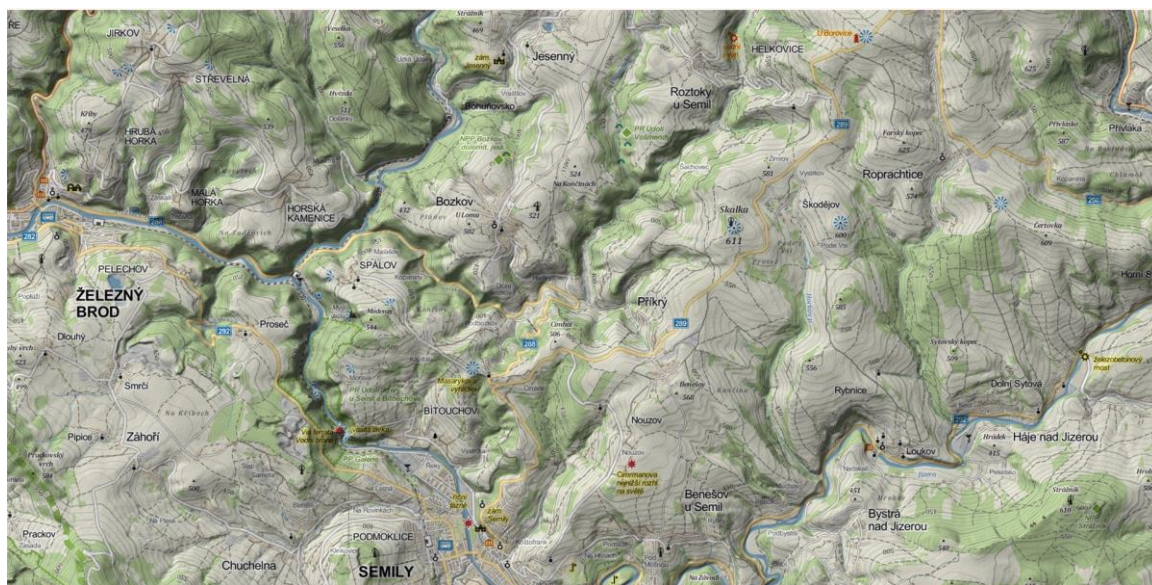


Stimulus 13b (Trial 3) experimentu Shading – Mapy.cz . Úkol: *Najděte a myší označte vrchol „Horka“.*

Příloha 3 Ukázka stimulů experimentu Shading – Mapy.cz



Stimulus 17a (Trial 6) experimentu Shading – Mapy.cz. Úkol: *Najděte a myší označte obec „Škodějov“.*



Stimulus 17b (Trial 6) experimentu Shading – Mapy.cz . Úkol: *Najděte a myší označte vrchol „Proseč“.*

Příloha 4 Ukázka stimulů experimentu Extinct Village



Stimulus (výřez) s leteckým snímkem z roku 1947 experimentu Extinct Village. Free viewing stimulus.



Stimulus (výřez) s otiskem Stablního katastru experimentu Extinct Village. Free viewing stimulus.



Stimulus (výřez) s 3D modelem obce experimentu Extinct Village. Free viewing stimulus.

Příloha 4 Ukázka stimulů experimentu Extinct Village

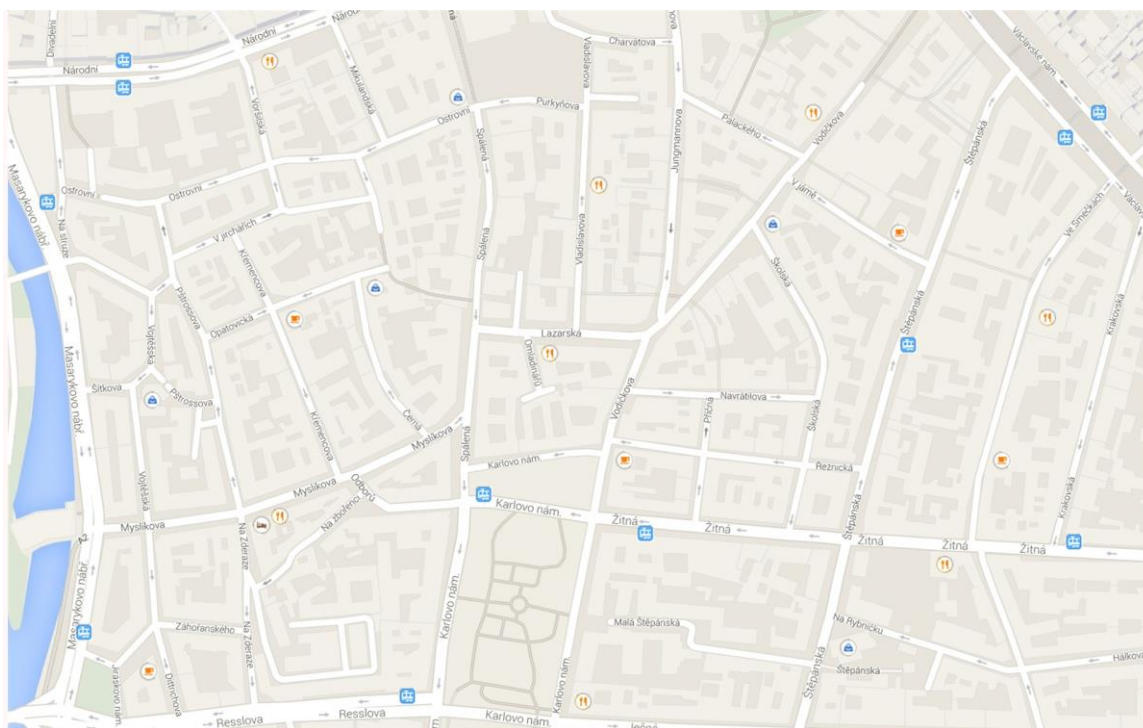


Stimulus „Najdi školu“ s leteckým snímkem z roku 1947 experimentu Extinct Village. Úkol: Najdi a myší označ budovu školy.

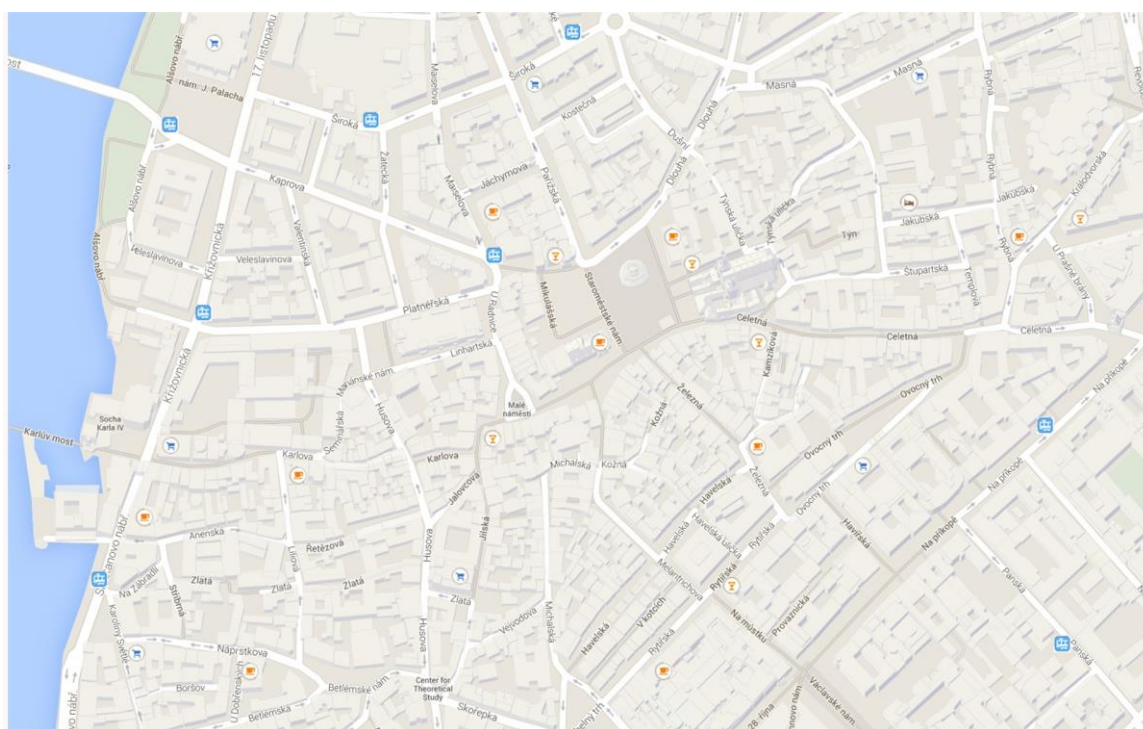


Stimulus „Najdi školu“ s 3D modelem obce experimentu Extinct Village. Úkol: Najdi a myší označ budovu školy.

Příloha 5 Ukázka stimulů experimentu 3D Cities

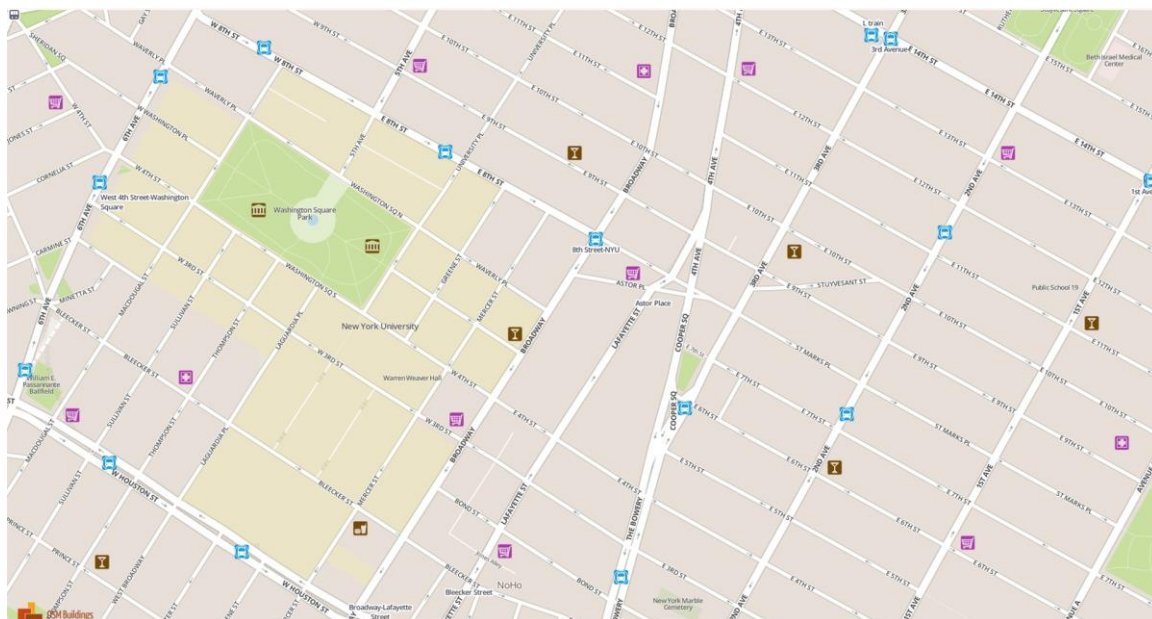


Stimulus 1 (2D) z portálu Google Maps experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myší v mapě označte „Ubytování“.*

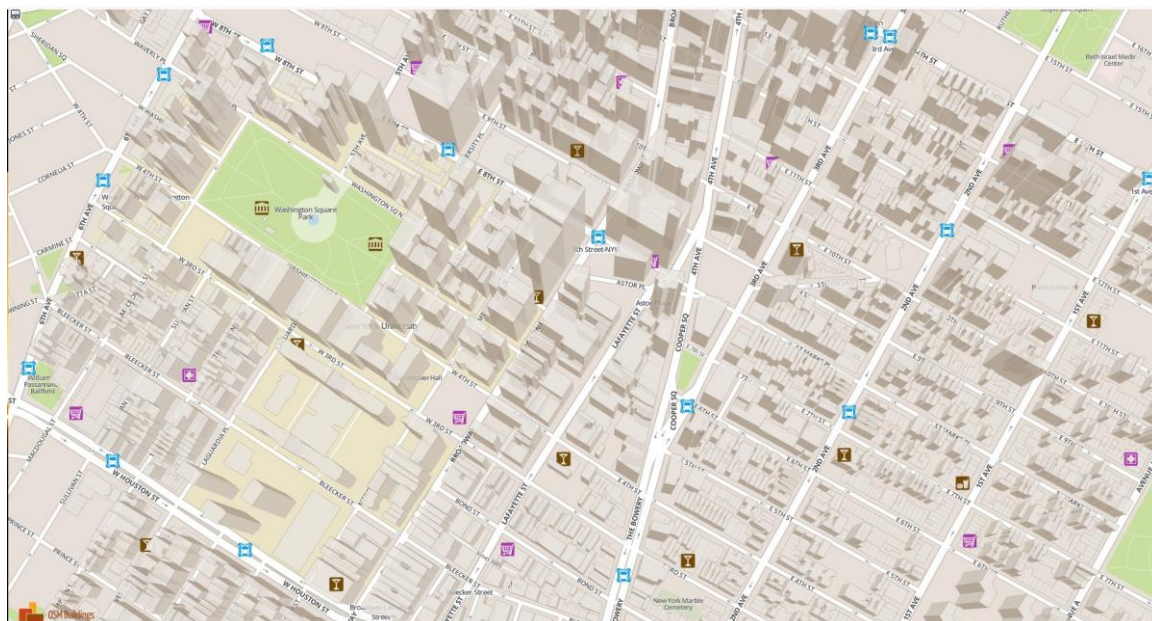


Stimulus 1 (3D) z portálu Google Maps experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myší v mapě označte „Ubytování“.*

Příloha 5 Ukázka stimulů experimentu 3D Cities

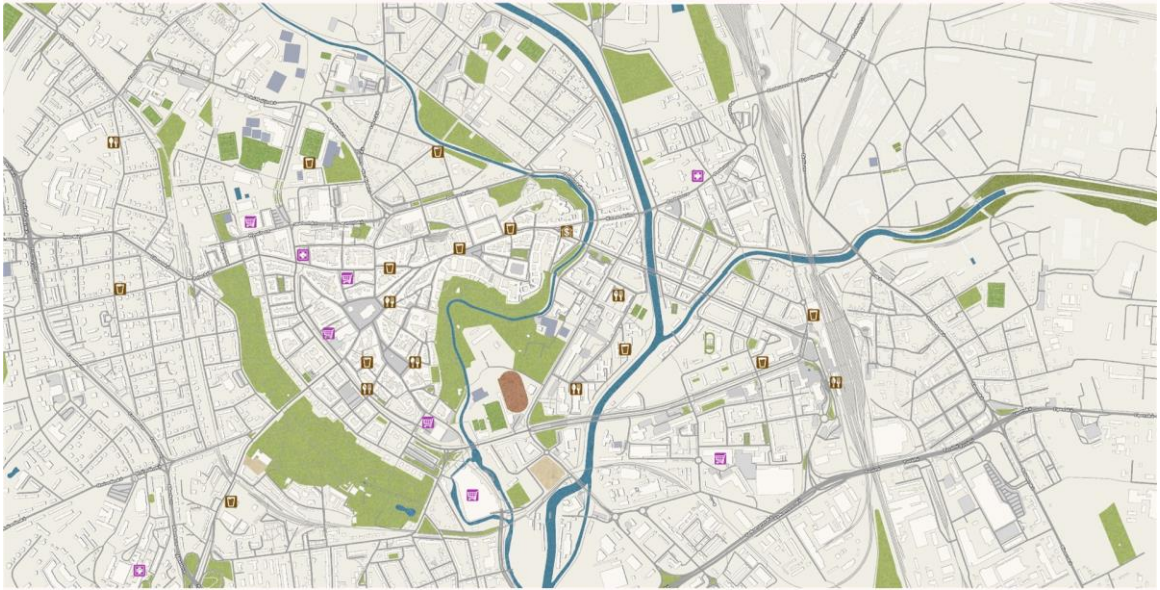


Stimulus 5 (2D) z portálu OSMbuildings experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myš v mapě označte „Fastfood“.*



Stimulus 5 (3D) z portálu OSMbuildings experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myš v mapě označte „Fastfood“.*

Příloha 5 Ukázka stimulů experimentu 3D Cities

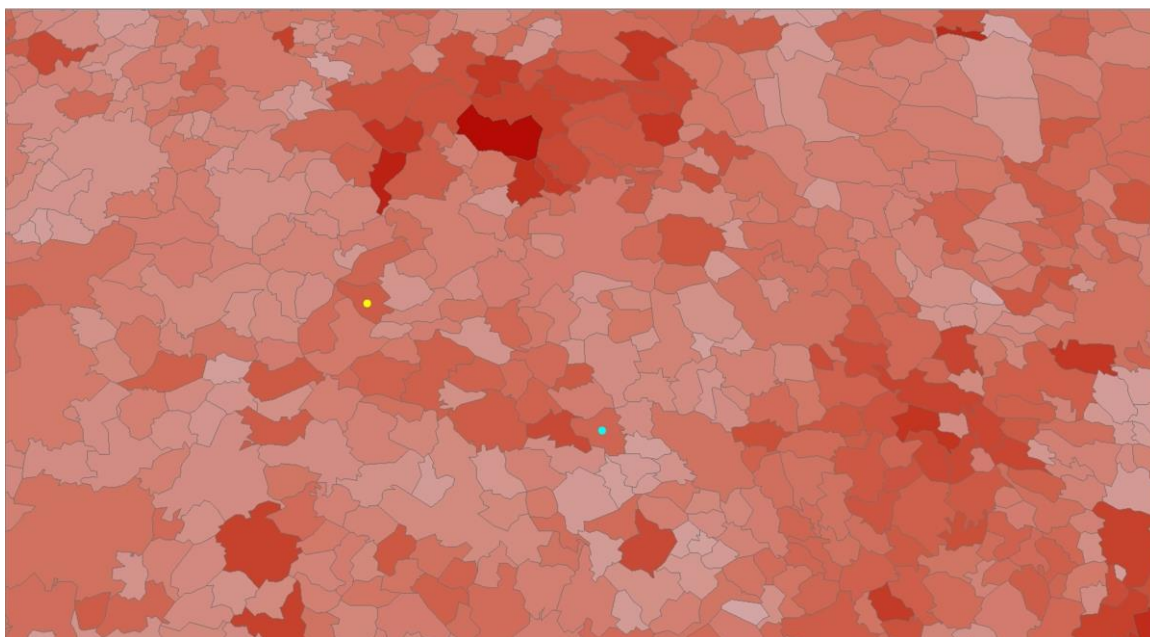


Stimulus 9 (2D) z portálu F4 Map experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myší v mapě označte „Banku“.*

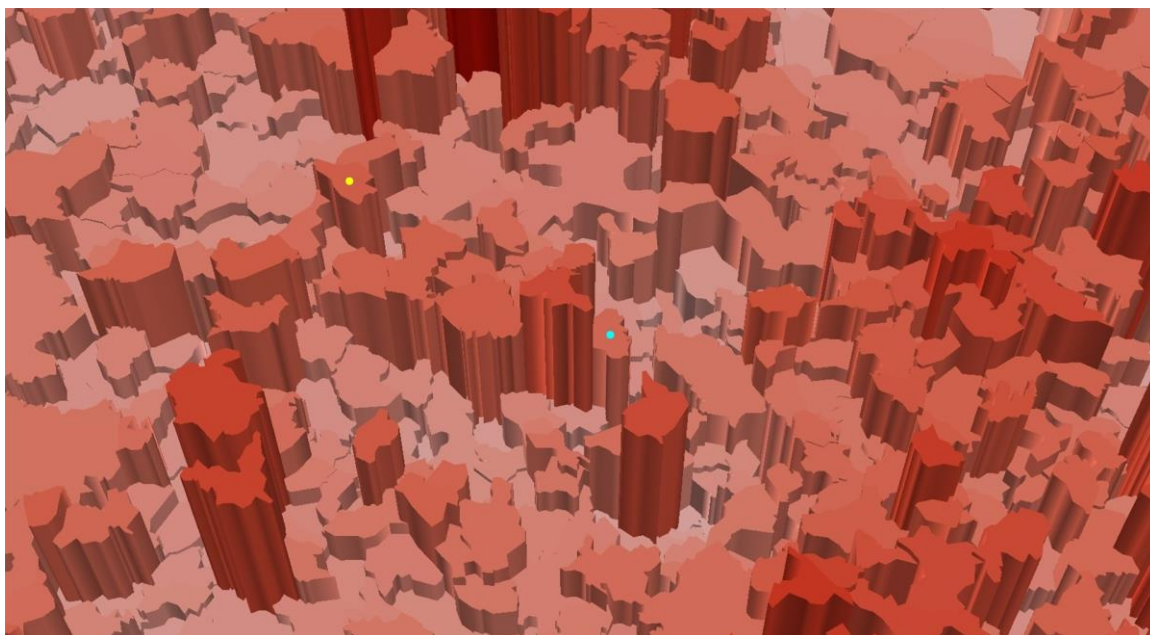


Stimulus 9 (3D) z portálu F4 Map experimentu 3D Cities. Úkol: *Najděte a myší v mapě označte „Banku“.*

Příloha 6 Ukázka stimulů experimentu 3D Thematic – Areal



Stimulus 4 experimentu 3D Thematic – Areal obsahující jednoduchý kartogram. Otázka:
Ve kterém areálu je znázorněna vyšší hodnota jevu?



Stimulus 4 experimentu 3D Thematic – Areal obsahující prostorový kartogram. Otázka:
Ve kterém areálu je znázorněna vyšší hodnota jevu?

Příloha 6 Ukázka stimulů experimentu 3D Thematic – Areal



Stimulus 4 experimentu 3D Thematic – Arealů obsahující jednoduchý kartogram. Otázka: *Ve kterém areálu je znázorněna vyšší hodnota jevu?*



Stimulus 4 experimentu 3D Thematic – Arealů obsahující stínovaný kartogram. Otázka: *Ve kterém areálu je znázorněna vyšší hodnota jevu?*

Příloha 7 Ukázka stimulů experimentu 3D Thematic – Points



Stimulus 3 experimentu 3D Thematic – Points obsahující mapu s 3D bodovými znaky. Úkol: *Označte všechny znaky patřící do prostřední velikostní kategorie.*



Stimulus 3 experimentu 3D Thematic – Points obsahující virtuální globus s 3D bodovými znaky. Úkol: *Označte všechny znaky patřící do prostřední velikostní kategorie.*



KATEDRA GEOINFORMATIKY

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

HODNOCENÍ 3D VIZUALIZACÍ V GIS S VYUŽITÍM SLEDOVÁNÍ POHYBU OČÍ

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: P1314 Geografie

Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie

Školitel: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Mgr. Stanislav POPELKA

EVALUATION OF 3D VISUALIZATION IN GIS USING EYE-TRACKING

Ph.D. THESIS SUMMARY

Study Programme: Geography

Specialization: Geoinformatics and Cartography

Supervisor: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Department of Geoinformatics

Faculty of Science, Palacký University Olomouc

Olomouc 2015

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Dissertation thesis was compiled within Ph.D. study at the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc.

Předkladatel / Submitter:

Mgr. Stanislav Popelka

Školitel / Supervisor:

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Katedra geoinformatiky

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

17. listopadu 50

771 46 Olomouc

Oponenti / Opponents:

doc. RNDr. Petr Kubíček, CSc. (Masarykova univerzita, Brno)

doc. Ing. Václav Talhofer, CSc. (Univerzita obrany, Brno)

doc. Ing. Jitka Komárková, Ph.D. (Univerzita Pardubice)

Autoreferát byl zaslán dne / Summary was posted on: _____

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

The defence of the dissertation thesis will be held on _____ at the commission for the defence of dissertation thesis of Ph.D. degree in study programme P1314 Geography, specialization Geoinformatics and cartography, in the premises of the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University Olomouc, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 77 46 Olomouc.

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

© Stanislav Popelka, 2015

ISSN 1805-7500

Obsah

1.	Abstrakt.....	4
2.	Cíle práce a postup řešení.....	5
3.	Hodnocení metod analýzy eye-tracking dat.....	10
4.	Případová studie – 3D reprezentace reliéfu.....	13
5.	Případová studie – 3D vizualizace měst.....	17
6.	Případová studie – Tematické 3D mapy.....	21
7.	Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii.....	26
8.	Výsledky.....	27
9.	Diskuze.....	29
10.	Závěr.....	30
11.	Použité zdroje.....	31
	Odborný životopis autora.....	33
	Seznam vybraných publikací autora související s disertační prací.....	34
	Ostatní publikace autora.....	36

Contents

	Curriculum vitae	33
	Author's selected publications related to the dissertation.....	34
	Another author's publications.....	36
	Annotation.....	38
	Summary.....	39

1. Abstrakt

Cílem disertační práce je vyhodnocení vhodnosti metod 3D vizualizace v geografických informačních systémech pomocí analýzy eye-tracking experimentů.

První dílčí cíl je zaměřen na výběr nejvhodnějšího nastavení identifikačního algoritmu pro klasifikaci naměřených dat na fixace a sádky. Další částí prvního dílčího cíle je klasifikace, popis a praktické představení patnácti metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat vhodných pro kartografický výzkum. Výsledkem dílčího cíle je rozhodovací schéma pro výběr nejvhodnější metody a ohodnocení metod dle náročnosti a rychlosti použití. Tyto výstupy lze použít pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat v budoucích experimentech s kartografickou tematikou.

Obsahem druhého dílčího cíle je návrh, průběh a vyhodnocení sedmi eye-tracking experimentů zaměřených na analýzu rozdílného vnímání 2D a 3D kartografických vizualizací. Vyhodnocení experimentů proběhlo s využitím metod popsaných a ohodnocených v první části práce. Pro hodnocení byly vybrány tři tematické oblasti, ve kterých je 3D vizualizace využívána. Jednalo se o vizualizaci reliéfu, městské zástavby a tematické 3D mapy.

Výsledkem třetího dílčího cíle je sada doporučení pro eye-tracking testování a vyhodnocení eye-tracking dat v kartografickém výzkumu. Sada doporučení byla vytvořena na základě zkušeností autora z tvorby, provedení a analýzy eye-tracking experimentů v disertační práci, stejně jako z dalších provedených eye-tracking experimentů.

Potenciál analýzy pohybu očí při čtení a práci s mapou nebyl v České republice doposud využit. Díky klesající ceně profesionálních eye-trackerů a rozmachu levných zařízení je možné v blízké budoucnosti očekávat stále více eye-tracking studií zaměřených na analýzu map a kartografických děl. Autor věří, že jeho disertační práce usnadní kartografům počátky práce s eye-tracking zařízením, dopomůže kvalitnímu hodnocení uživatelské percepce map a také pomůže objasnit efektivitu 3D vizualizace v kartografii.

Klíčová slova:

Kartografie, eye-tracking, sledování pohybu očí, 3D, vizualizace

2. Cíle práce a postup řešení

Hlavním cílem disertační práce je vyhodnocení vhodnosti metod 3D vizualizace v geografických informačních systémech pomocí analýzy eye-tracking experimentů.

V současném pojetí je za 3D metodu (kartografické) vizualizace obvykle považován dvojrozměrný obraz v perspektivním pohledu (Voženílek, 2005). Právě tyto perspektivní pohledy, aplikované na různé typy kartografických dat, budou nejčastějším typem hodnocených stimulů, tedy obrazů prezentovaných v průběhu experimentu. V případě perspektivního pohledu se jedná o 3D vizuální reprezentaci dat, která je následně zobrazená na 2D rovině monitoru počítače.

Metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat existuje velké množství, ne všechny jsou však vhodné pro analýzu záznamů pohybu oka při řešení úkolů s kartografickou tematikou. Vhodné metody budou podrobně popsány a jejich možnosti budou představeny na příkladu kartografických úloh. Kromě běžně využívaných metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat budou pro řešení cílů disertační práce využity postupy vizualizace a analýzy využívané v GIS aplikacích. Jednotlivé metody budou ohodnoceny na základě několika kritérií. Finálním rozhodovacím schématem bude poskytnut návod pro výběr konkrétní metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat.

Nejvhodnější metody analýzy a vizualizace budou aplikovány na data naměřená v sedmi eye-tracking experimentech zaměřených na rozdíly ve vnímání různých metod 3D vizualizace využívaných v kartografii. Zjištěné poznatky o možnostech a omezeních eye-trackingu v kartografickém výzkumu budou shrnuty do sady doporučení.

Cíle disertační práce jsou rozděleny do tří dílčích částí:

DC1 – Rozbor vhodnosti metod analýzy eye-tracking dat

DC2 – Návrh, sestavení, průběh a vyhodnocení experimentů

DC3 – Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii

První dílčí cíl je zaměřen na výběr nejvhodnějšího nastavení identifikačního algoritmu I-DT, pomocí kterého budou naměřená prvotní (raw) data klasifikována na fixace a sakády. Další částí DC 1 je klasifikace, popis a praktické

představení metod analýzy eye-tracking dat. Jedná se o následujících patnáct metod rozdělených do sedmi kategorií:

- Vizualizace trajektorií – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube
- Porovnání průběhu trajektorií – Scanpath comparison
- Attention maps
- Analýzy oblastí zájmu – AOI Transitions, Gridded AOI, Sequence Chart, Binning Chart
- GIS analýzy v programu V-Analytics – FlowMap, TimeLine
- Manuální analýza eye-tracking dat
- Statistická analýza – Eye-tracking metriky

Výsledkem DC 1 je popis 15 vybraných metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat, rozhodovací schéma pro výběr nejvhodnější metody a ohodnocení metod dle náročnosti a rychlosti použití. Rozhodovací schéma a hodnocení metod lze použít pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat v budoucích experimentech s kartografickou tématikou.

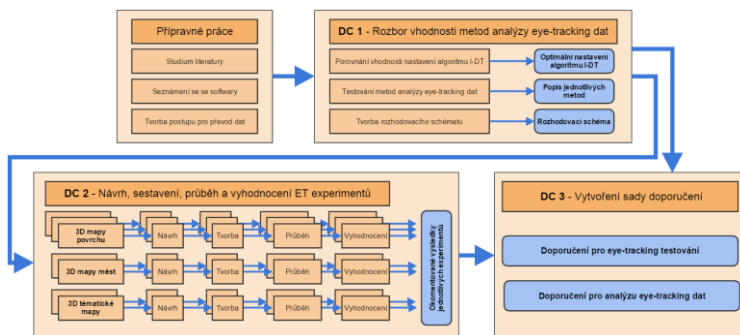
Obsahem **druhého dílčího cíle** je návrh, průběh a vyhodnocení experimentů zaměřených na analýzu rozdílného vnímání 2D a 3D kartografických vizualizací. Vyhodnocení experimentů proběhne s využitím metod popsaných a ohodnocených v DC 1. Výstupem DC 2 je sada 7 experimentů (tab. 1), naměřená data a okomentované výsledky jednotlivých experimentů.

Tab. 1 Experimenty vypracované v rámci disertační práce

	Experiment	Téma experimentu	Metoda sběru dat
DC 2a Reliéf	DualMap	Perspektivní pohledy	Eye-tracking + dotazník
	SingleMap	Perspektivní pohledy	Eye-tracking
	Shading – Mapy.cz	Stínování v mapách	Eye-tracking + dotazník
DC 2b Města	Extinct Village	Fotorealistická vizualizace obce	Eye-tracking
	3D Cities	Nefotorealistická vizualizace měst	Eye-tracking + dotazník
DC 2c Tematický obsah	Thematic 3D – Areals	Tematické 3D mapy – Prostorový kartogram a stínovaný kartogram	Eye-tracking
	Thematic 3D - Points	Tematické 3D mapy – 3D bodové znaky	Eye-tracking

Výsledkem **třetího dílčího cíle** je sada doporučení pro eye-tracking testování a vyhodnocení eye-tracking dat v kartografickém výzkumu. Sada doporučení je vytvořena na základě zkušeností autora z tvorby, provedení a analýzy sedmi eye-tracking experimentů, které vznikly při řešení DC 2, stejně jako z dalších experimentů, které autor provedl jako krátké výzkumné studie nebo pro testování možností eye-trackeru.

Postup práce byl rozdělen do částí odpovídajících dílčím cílům (obr. 1).



Obr. 1 Postup řešení cílů disertační práce

Přípravné práce

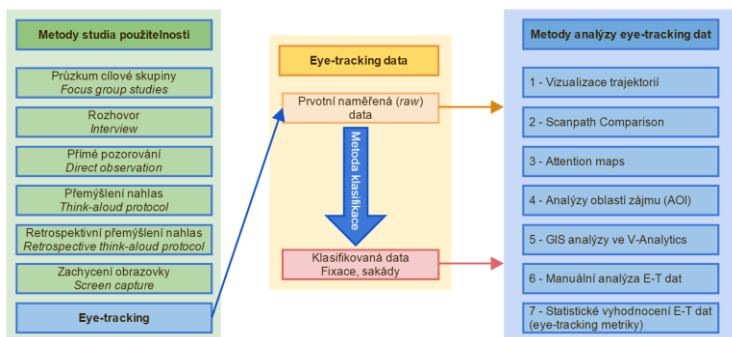
Ještě před vlastním řešením dílčích cílů práce si autor osvojil poznatky o eye-tracking testování a o jeho využití v kartografickém výzkumu. Nastudoval si rovněž problematiku 3D kartografické vizualizace a možnosti jejího hodnocení. Rovněž se seznámil s možnostmi eye-trackeru a aplikace pro analýzu dat. V práci je kromě programu BeGaze využita i open-source aplikace OGAMA a nástroj V-Analytics. V přípravné fázi bylo nutné vytvořit nástroje pro převod dat mezi těmito programy.

DC 1

Eye-tracking je jednou z metod aplikovaných ve studiích použitelnosti (Li a kol., 2010) (zelená část obrázku 2). Výstupem z eye-tracking testování jsou prvotní (raw) data, která je možné klasifikovat na fixace a sakády (žlutá část obrázku 2). První část řešení dílčího cíle se věnuje popisu různých algoritmů pro jejich identifikaci a volbou nejvhodnějšího nastavení algoritmu I-DT (Dispersion Threshold Identification) pro kartografický výzkum. Výběr optimálního nastavení proběhl na základě vizuálního porovnání pozice identifikovaných fixací a prvotních (raw) dat. Tuto metodu doporučuje jako optimální Holmqvist (2011) v publikaci „Eye tracking: A comprehensive guide to methods and

measures“. Na základě tohoto porovnání zvolil autor vlastní nastavení prahových hodnot algoritmu I-DT, které bylo použito ve všech experimentech v DC 2.

Existuje velké množství metod analýzy eye-tracking dat. V modře označené části obrázku 2 jsou uvedeny skupiny metod vhodných pro kartografický výzkum. Z těchto skupin bylo vybráno 15 metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat, které byly detailně popsány a otestovány na úlohách s kartografickou tematikou. Následně bylo vytvořeno rozhodovací schéma pro volbu metody vhodné k analýze a vizualizaci různých typů eye-tracking dat. Expertním odhadem autora byla ohodnocena náročnost a rychlost použití jednotlivých metod.



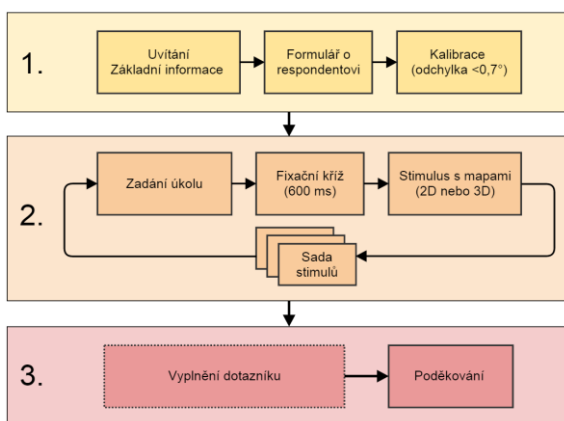
Obr. 2 Eye-tracking v systému metod studia použitelnosti, klasifikace eye-tracking dat a metody analýzy eye-tracking dat vhodné pro kartografický výzkum

DC 2

Při řešení druhého dílčího cíle bylo navrženo, vytvořeno, provedeno a analyzováno sedm eye-tracking experimentů. V experimentech byly porovnávány různé typy 2D a 3D kartografických vizualizací za účelem zjištění jejich vhodnosti pro uživatele při řešení určitých typů prostorových úloh. Na začátku každého experimentu byly formulovány výzkumné hypotézy, které byly pomocí eye-tracking testování ověřeny. Podle těchto hypotéz byly poté vytvořeny testovací stimuly.

Vlastní tvorba experimentu s volbou pořadí stimulů, délkou jejich prezentace, přípravou formuláře po případné odpovědi uživatelů atd. byla v některých případech doplněna o sestavení dotazníku pro zjištění subjektivního názoru respondentů na prezentované typy vizualizace (obr. 3). Na začátku každého testování vyplnil respondent ve formuláři několik informací o sobě (věk, pohlaví, kartografické vzdělání). Před spuštěním vlastního experimentu byl kalibrován přístroj pro respondentovy oči tak, aby byl záznam co nejpřesnější (žlutá část

obrázku 2). Po úspěšné kalibraci (odchylka $< 0,7^\circ$) se respondentovi zobrazilo zadání konkrétního úkolu. Poté došlo k velice krátkému (600 ms) zobrazení tzv. fixačního kříže, jehož účelem je nastavit stejnou počáteční pozici jednotlivých trajektorií. Nakonec byl respondentovi po určitý čas zobrazen vlastní stimulus. Poté následovala další otázka (oranžová část obrázku 3). Pokud to bylo výhodné, bylo zvoleno náhodné pořadí stimulů. V některých případech byl eye-tracking experiment doplněn o dotazník zaměřený na subjektivní názor respondenta na použité vizualizace. Tento dotazník respondent vyplnil ihned po skončení eye-tracking testování (červená část obrázku 3).



Obr. 3 Design eye-tracking experimentů

Při tvorbě všech eye-tracking experimentů byl využit within-subject design experimentu. To znamená, že všichni respondenti viděli všechny stimuly experimentu. Protože byly porovnávány dvojice stimulů (2D a 3D), bylo nutné jeden ze stimulů ve dvojici upravit tak, aby bylo zamezeno efektu učení (respondent si nepamatoval odpověď z druhého stimulu ve dvojici). Tyto úpravy stimulů byly voleny tak, aby měly co nejmenší vliv na uživatele a bylo možné testovaný typ vizualizace (2D a 3D) porovnat. Pro statistické hodnocení eye-tracking metrik byl ve většině experimentů využit dvouvýběrový Wilcoxonův test.

DC 3

Při řešení třetího dílčího cíle byly shrnuty zkušenosti s návrhem, průběhem a analýzou eye-tracking experimentů získané během tvorby práce. Na základě autorových zkušeností získaných při tvorbě disertační práce i při dalším eye-tracking výzkumu byla zformulována obecná i konkrétní doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu, tvorbu stimulů a nastavení experimentu.

3. Hodnocení metod analýzy eye-tracking dat

Data o pohybu očí jsou ve své podstatě data časoprostorová. Pro jejich analýzu je možné využívat metody známé ze studií, které se zabývají daty s časovou a prostorovou složkou (např. (Andrienko a Andrienko, 2013; Andrienko a Andrienko, 2006)). Přesto má analýza eye-tracking dat svá specifika.

V disertační práci je popsáno celkem 15 metod analýzy eye-tracking dat, které jsou vhodné pro kartografické účely. Metody byly vybrány na základě zkušenosti autora a rešerše kartografických publikací zabývajících se eye-trackingem.

Přestože některé ze zmíněných metod analýzy lze použít i pro analýzu prvotních naměřených dat (raw data), všechny zmíněné metody pracují i s daty klasifikovanými na fixace a sakády. Ve většině případů je využití klasifikovaných dat vhodnější. Proto bylo nutné vhodně zvolit klasifikační algoritmus a jeho nastavení.

Srovnání nastavení algoritmu I-DT

Fixace je možné identifikovat manuálně (Harris a kol., 1988), ale existuje také velké množství klasifikačních algoritmů. Komogortsev (2010) uvádí, že mezi nejčastěji používané algoritmy patří I-VT (Velocity Threshold Identification) a I-DT (Dispersion Threshold Identification). Data v případových studiích disertační práce byla naměřena pomocí zařízení SMI RED 250, jehož vzorkovací frekvence je 120 Hz. Z toho důvodu byl pro detekci fixací a sakád využit právě algoritmus I-DT, který je implementován v aplikaci BeGaze, jež byla dodána spolu se zařízením, a který je pro analýzy dat s nižší frekvencí (<250 Hz) vhodnější. I-DT algoritmus vyžaduje dva parametry – prahovou hodnotu pro rozptyl (Dispersion) a délku trvání fixace (Duration).

Hledáním optimální prahové hodnoty rozptylu se zabýval Blignaut (2009). Ve své detailní studii došel k závěru, že optimální prahová hodnota pro rozptyl by měla být 1°. Ve většině studií zaměřených na hodnocení kartografických děl údaj o nastavení identifikačních algoritmů chybí. Hermans a Laarni (2003), kteří se zabývali analýzou hledání konkrétního objektu v interaktivní mapě, použili prahovou hodnotu rozptylu 2°. Coltekin (2009) zkoumala efektivitu interaktivních map a prahovou hodnotu rozptylu nastavila na 50 px. Sama autorka však uvádí, že se toto nastavení neopírá o žádná předem stanovená pravidla. Stejné nastavení využila i ve své další studii (Coltekin a kol., 2010) a uvádí příklady dalších autorů, kteří použili stejné nastavení (např. (Goldberg a Kotval, 1999)). Stanovení prahových hodnot algoritmu I-DT se může lišit podle oblasti studia a konkrétní studie. Doporučuje se také, aby byly vytvořené fixace porovnány s původními naměřenými daty (Holmqvist a kol., 2011).

Před vlastním vyhodnocením dat naměřených v případových studiích byly srovnány čtyři nastavení I-DT algoritmu. **Fix1** je základní nastavení používané programem SMI BeGaze. Nastavení **Fix2** použité ve studii Blignaut (2009) je velice podobné prvnímu zmiňovanému. Nastavení používané například ve studii Coltekin (2009), ale i dalšími autory je označené jako **Fix3**. Nastavení **Fix4** je definováno autorem na základě porovnání identifikovaných fixací s původními naměřenými daty. Prahové hodnoty jednotlivých nastavení jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Srovnávaná nastavení identifikačního algoritmu

	Fix 1	Fix2	Fix 3	Fix 4
Autor nastavení	SMI Default	Blignaut (2009)	Coltekin (2009)	Popelka
Délka (ms)	80	100	100	80
Rozptyl (px)	100	90	50	50
Autor nastavení	SMI Default	Blignaut (2009)	Coltekin (2009)	Popelka

Volba metody analýzy E-T dat

Výsledkem řešení dílčího cíle je postup výběru vhodné metody analýzy eye-tracking dat zaznamenaných při sledování stimulů s kartografickou tématikou.

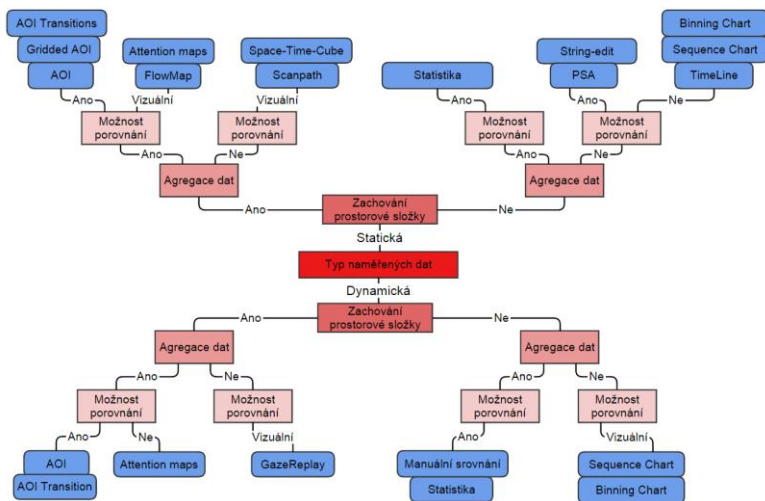
Tab. 3 Výstupy popsanych metod analýzy eye-tracking dat

Metoda	Výstup
GazeReplay	Videozáznam s průběhem trajektorie pohledu
Scanpath	Průběh trajektorie pohledu
STC	Průběh trajektorie pohledu v 3D
String-edit distance	Statistické a grafické porovnání uživatelů dle pořadí navštívených AOI
PSA	Statistické a grafické porovnání uživatelů dle průběhu trajektorie
Attention maps	Attention mapa zobrazující exponovaná místa stimulu
AOI	Statistické porovnání E-T metrik v jednotlivých oblastech zájmu
AOI Transitions	Zobrazení přesunů pohledu mezi jednotlivými AOI
Gridded AOI	Statistické porovnání E-T metrik v gridu nad stimulem
Sequence Chart	Graficky znázorněné pořadí navštívených AOI
Binning Chart	Statistický přehled navštívených oblastí zájmu pro časové řezy
FlowMap	Agregovaná trajektorie pohledu pro více uživatelů
TimeLine	Graf vzdálenosti pohledu od určitého bodu v čase
Manuální analýza	Tabulka se záznamem jednotlivých činností uživatele

Při výběru vhodné metody pro analýzu eye-tracking dat by se měl analytik řídit především informační hodnotou výstupu analýzy – tedy co je výstupem metody a k čemu může sloužit. Tabulka 3 stručně shrnuje výstupy všech patnácti metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat popsaných v disertační práci.

Rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace E-T dat

Výběr metody analýzy eye-tracking dat také závisí na typu naměřených dat, protože všechny metody nejsou vhodné pro všechny typy naměřených dat. Při řešení prvního dílčího cíle autor vytvořil rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy eye-tracking dat (obr. 4). Toto schéma obsahuje čtyři kritéria rozhodování, na základě jejichž volby se vybírá vhodná metoda, a to typ naměřených dat, zachování prostorové složky, agregace dat a možnost porovnání.



Obr. 4 Rozhodovací schéma výběru metody analýzy eye-tracking dat z hlediska vhodnosti metody

Při výběru vhodné metody je důležitý především výběr metody v závislosti na **typu naměřených dat**. Dalším důležitým faktorem při výběru metody analýzy je fakt, zda zůstane zachována vazba na **prostorovou složku dat**, tedy zda bude výsledek metody analýzy možné vztáhnout k určité části stimulu, nebo zda budou data schematizována. Kritérium **agregace dat** popisuje, zda jsou výsledná data agregována pro všechny uživatele (nebo jejich skupiny), nebo jsou rozlišitelné záznamy pohybu oka jednotlivých respondentů. Posledním uvažovaným kritériem rozhodování je možnost **porovnání uživatelů** nebo jejich skupin mezi sebou.

4. Případová studie – 3D reprezentace reliéfu

Hodnocení použitelnosti perspektivních 3D map bylo doposud prováděno většinou pomocí dotazníkového šetření (např. (Petrovič a Mašera, 2004; Savage a kol., 2004)). Eye-tracking byl doposud využit pouze na univerzitě v Helsinkách (Putto a kol., 2014).

Cílem případové studie bylo analyzovat rozdíly ve vnímání klasických ortogonálních map a jejich ekvivalentů vytvořených pomocí 3D vizualizace. Byly realizovány tři eye-tracking experimenty doplněné o krátký dotazník. Všech tří experimentů se zúčastnilo 40 respondentů. Polovina z nich byli studenti pregraduálního studia geoinformatiky, kteří absolvovali kurz kartografie. Druhou polovinou respondentů byli studenti jiných oborů, kteří během studia nepřišli s kartografií do styku.

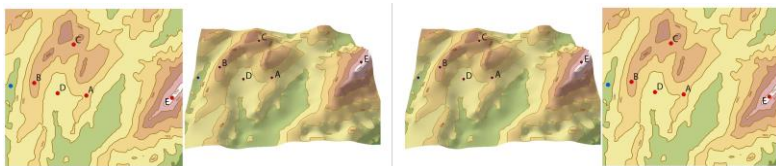
První experiment byl označen jako „DualMap“, protože stimuly vždy obsahovaly dvojici map (2D, 3D) vedle sebe. Hypotézy v DualMap experimentu zněly:

H1: Respondenti budou v dotazníku preferovat 3D mapu

H2: Vyšší hodnota Dwell Time bude zaznamenána v AOI okolo 3D mapy

H3: Vyšší počet odpovědí (kliknutí myši) bude zaznamenán v 3D mapě

Experiment obsahoval celkem 11 stimulů. Pro statistickou analýzu bylo vybráno pět stimulů (Q4–Q8) DualMap experimentu, které byly inspirovány studií (Savage a kol., 2004). V těchto stimulech je terén vyjádřen pomocí barevné hypsometrie (2D mapa) a perspektivního pohledu na mapu s barevnou hypsometrií doplněnou o stínování.



Obr. 5 Dvě varianty stejného stimulu DualMap experimentu. Varianta 2D3D (vlevo) a 3D2D (vpravo).

Pro zabránění vlivu umístění vizualizace v rámci stimulu (vlevo-vpravo) byly vytvořeny dvě varianty každého stimulu. Na první z nich byla 2D mapa v levé části a 3D vizualizace v pravé části (2D-3D). Ve druhé variantě bylo umístění opačné (3D-2D). Při vlastním testování byla každému uživateli přiřazena náhodná varianta jednotlivých stimulů (obr. 5).

Hypotéza, že respondenti budou v dotazníku preferovat 3D mapu se potvrdila u všech tří aspektů – přehlednosti, vhodnosti i estetičnosti. Další hypotézy

DualMap experimentu nemohly být potvrzeny ani vyvráceny, protože výsledky DualMap experimentu byly ovlivněny pořadím map ve stimulu více než použitou vizualizací. Proto bylo přistoupeno k tvorbě a analýze SingleMap experimentu. Hypotézy v tomto experimentu zněly:

H1: Delší trajektorie pohybu oka bude zaznamenána u nekartografů

H2: Delší trajektorie pohybu oka bude zaznamenána u 3D varianty stimulu

H3: Respondenti budou mít jinou strategii při čtení 2D a 3D varianty stimulu

SingleMap experiment obsahoval celkem 15 stimulů, které byly podobné stimulům z DualMap experimentu, avšak každý stimulus obsahoval pouze jeden typ vizualizace (2D nebo 3D). Stimuly byly respondentům prezentovány v náhodném pořadí. Protože se jednalo o within-subject experiment, byla 3D varianta mapy modifikována tak, aby si respondenti nepamatovali odpověď na otázku z 2D varianty.

U SingleMap experimentu bylo oproti hypotéze zjištěno, že ve všech případech byla u kartografů zaznamenána delší trajektorie pohybu oka (Scanpath Length) než u nekartografů. Tento fakt je možné interpretovat tak, že kartografové mají s používáním map větší zkušenost, a proto si je prohlížejí důkladněji. Rovněž byl zjištěn statisticky významný rozdíl v délce Scanpath mezi 2D a 3D mapou T3 a T4. Vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě 3D mapy. Pomocí metody analýzy dat Scanpath Comparison bylo zjištěno, že přestože nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl u dalších eye-tracking metrik, je strategie uživatelů při čtení 2D a 3D mapy rozdílná.

Cílem třetího experimentu v této případové studii (Shading – Mapy.cz) bylo ověřit, zda má stínování v turistických mapách vliv na hledání určitého objektu. Respondenti měli za úkol co nejrychleji v mapě nalézt určitý vrchol nebo obec. Bylo zjišťováno, zda má stínování pozitivní vliv při hledání vrcholů a současně zda negativně ovlivňuje respondenta v případě, že úkolem je nalézt obec. Byly ověřovány následující hypotézy:

H1: Z hlediska vhodnosti budou respondenti v dotazníku preferovat nestínovanou (2D) mapu

H2: Z hlediska estetiky budou respondenti v dotazníku preferovat stínovanou (3D) mapu

H3: Hledání vrcholu bude jednodušší na stínované (3D) variantě mapy

H4: Hledání obce bude složitější na stínované (3D) variantě mapy

Experiment „Shading-Mapy.cz“ obsahoval celkem 12 stimulů, 6 map se stínováním a 6 map bez stínování. Rovněž poměr otázek zaměřených na hledání

vrcholů a obcí byl vyvážený (6 vs. 6). Dvojice stimulů na obrázku 6 zobrazuje stejné území a liší se pouze metodou vizualizace (bez stínování, se stínováním). Jednalo se o (pro respondenty) poměrně neznámé území a málo významné obce a vrcholy.



Obr. 6 Dvojice stimulů z experimentu Shading – Mapy.cz. Každý obrázek je samostatný stimulus. V levé části je varianta bez stínování, vpravo stínovaná varianta. Správná odpověď je znázorněna červenou šipkou.

Při vizualizaci naměřených eye-tracking dat bylo využito postupu, který poprvé představil Brodersen (2002) a později jej upravila Ooms (2014). Nad analyzovanými stimuly je vytvořena pravidelná čtvercová mřížka. Odvozené eye-tracking metriky jsou vztaheny k jednotlivým buňkám této mřížky.

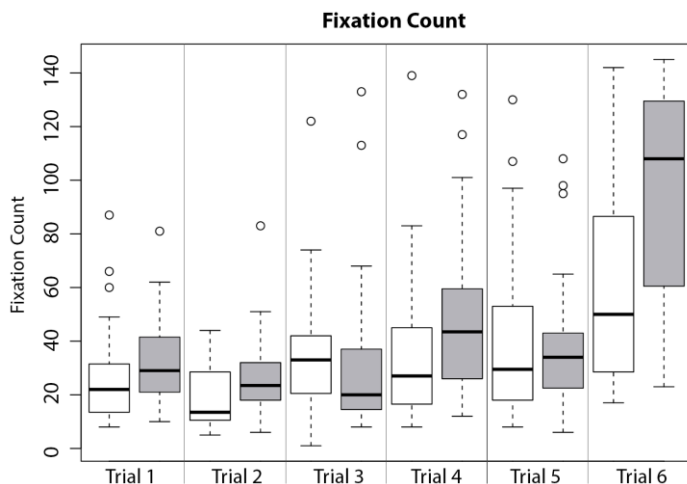
		12a - "Školický vrch"										12b - "Táhlý vrch"										Rozdíl Se stínováním - Bez stínování									
Otázka 2 - Vrchol	0	6	0	1	1	10	18	6	7	8	0	2	1	0	7	22	22	17	13	19	0	-4	1	-1	6	12	4	11	6	11	
	2	29	28	118	104	4	0	28	11	1	-4	51	59	57	27	4	2	46	14	2	1	22	21	-61	6	0	2	28	2	1	
	3	1	5	90	44	16	1	1	12	24	7	11	13	78	56	24	1	2	11	43	-4	10	8	-12	12	8	0	1	-1	19	
	13	12	4	18	3	25	5	17	3	5	11	9	12	104	18	42	5	27	8	10	-11	-9	8	104	15	17	0	10	5	5	
	10	0	4	16	1	4	44	1	1	0	28	5	7	80	5	8	57	4	7	0	18	5	3	64	4	4	13	3	6	0	

		13a - "Pelousek"										13b - "Horka"										Rozdíl Se stínováním - Bez stínování									
Otázka 3 - Vrchol	21	55	21	43	17	26	21	104	17	16	11	39	22	34	4	8	4	30	13	15	-10	-56	1	-9	-13	-18	-17	104	-4	-1	
	0	33	19	70	34	38	34	65	14	6	0	104	68	61	30	39	17	34	19	6	0	104	40	-9	-4	1	-17	-31	5	0	
	1	2	62	60	17	60	24	14	41	3	1	5	75	46	31	50	25	23	32	13	0	3	13	-14	14	-10	1	9	-9	10	
	32	17	40	11	79	40	34	14	7	17	17	38	31	6	48	21	15	12	9	10	-15	-18	-9	-5	-11	-9	-19	-2	2	27	
	27	1	8	63	3	23	29	3	0	1	25	4	12	58	6	18	21	6	2	1	-12	3	4	-5	3	-5	-18	3	2	0	

Obr. 7 Počty fixací naměřených ve vybraných stimulech experimentu Shading – Mapy.cz. V levých tabulkách jsou obsaženy počty fixací naměřených nad stimulem bez stínování. Prostřední tabulky obsahují data ze stimulů se stínováním. V pravých tabulkách je rozdíl obou předchozích gridů vzniklý odečtením stimulu bez stínování od stínované varianty.

Výhodou tohoto typu vizualizace je možnost s čísly v buňkách dále pracovat. V tomto případě byly od sebe odečteny hodnoty naměřené u varianty se stínováním a bez stínování. Výsledný grid byl opět pomocí funkce Podmínečně formátování obarven. Podle převahy kladných či záporných hodnot bylo určeno, u které varianty bylo naměřeno více fixací, z čehož bylo odvozeno, které části stimulu respondenty zaujaly nebo byly problematické.

Dalším krokem byla statistická analýza čtyř eye-tracking metrik. Téměř ve všech stimulech bylo zaznamenáno více fixací a delší Scanpath v případě stínované varianty.



Obr. 8 Hodnoty Fixation Count pro všech šest dvojic stimulů v experimentu Shading – Mapy.cz. Varianta se stínováním je označena pomocí šedé barvy.

Hypotéza, že respondenti budou z estetického hlediska preferovat stínovanou (3D) mapu se potvrdila. V otázce vhodnosti map pro řešení zadaného úkolu (hledání vrcholu či obce) byly odpovědi respondentů vyrovnané.

Analýza eye-tracking dat ukazuje, že statisticky významné rozdíly mezi stínovanou a nestínovanou mapou byly zjištěny v případě tří ze čtyř hodnocených eye-tracking metrik (Trial Duration, Fixation Count, Scanpath Length). Vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě stínované varianty mapy. Dále byl analyzován vliv otázky na hodnotu těchto eye-tracking metrik. Zde byly statisticky významné rozdíly nalezeny pro všechny čtyři sledované eye-tracking metriky, přičemž vyšší hodnoty byly zaznamenány v případě otázek zaměřených na hledání obce.

Hypotéza, že hledání vrcholu bude pro respondenty jednodušší na stínované variantě mapy, se nepotvrdila. Výsledky experimentu dokazují, že stínované mapy jsou pro vyhledávání obce i vrcholu méně vhodné než jejich varianta bez stínování, a to zejména v případě hledání obce.

5. Případová studie – 3D vizualizace měst

Existují dva základní přístupy při 3D vizualizaci měst – fotorealistická a nefotografická (Cartwright a Peterson, 2007).

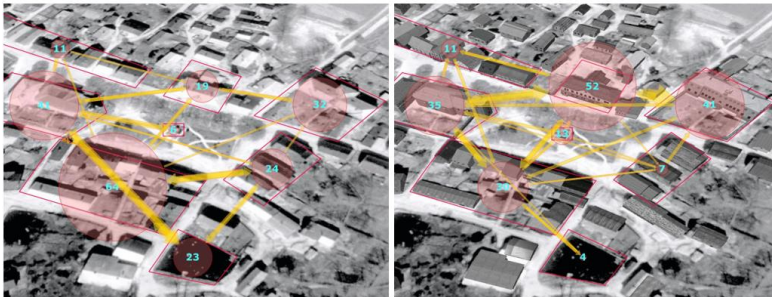
V rámci bakalářské práce Pavly Dědkové (2012), jejímž vedoucím byl autor disertace, vznikl fotorealistický 3D model zaniklé obce Čistá v Karlovarském kraji. Součástí bakalářské práce Pavly Dědkové bylo vytvoření krátkého eye-tracking experimentu, jehož cílem bylo prozkoumat rozdíly v percepci různých typů vizualizace této zaniklé obce. Bakalářská práce obsahovala pouze základní statistické zhodnocení a jednoduchou vizualizaci zaznamenaných eye-tracking dat. Naměřená data byla podrobně analyzována v disertační práci. Vytvořený eye-tracking experiment se skládal ze tří částí.

Stimuly v první části experimentu obsahovaly celkové pohledy na obec v pěti variantách – otisk Stablního katastru z roku 1841, letecký měřický snímek (LMS) z roku 1947 a 3D vizualizace obce zobrazená nad leteckým snímkem z roku 1947 (vázaná příloha 4). Tyto „free-viewing“ stimuly byly zobrazeny na dobu čtyř sekund a respondenti při jejich sledování nemuseli řešit žádný úkol. V druhé části experimentu bylo úkolem respondentů co nejrychleji nalézt určitou budovu v obci. Stimuly v této části obsahovaly otisk Stablního katastru z roku 1841, letecký měřický snímek (LMS) z roku 1947 a 3D vizualizaci obce zobrazenou nad tímto leteckým snímkem. Stimuly v poslední části experimentu obsahovaly detaily 3D modelu. Cílem experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

H1: Nejmenší počet fixací bude zaznamenán u stimulu obsahujícího 3D vizualizaci obce

H2: Nejvyšší počet fixací bude zaznamenán u stimulu obsahujícího otisk Stablního katastru

H3: Pro hledání konkrétní budovy v obci bude nejvhodnější 3D vizualizace obce
Při analýze dat naměřených při řešení druhého úkolu (nalezení budovy školy) nad leteckým snímkem z roku 1947 a 3D modelem zobrazeným nad tímto snímkem byla využita analýza oblastí zájmu (AOI). Oblasti zájmu byly vyznačeny jako okolí všech vizuálně významných míst na obou stimulech (obr. 9). Červené kruhy s čísly představují počet fixací všech 28 respondentů zaznamenaných v jednotlivých oblastech zájmu. Žluté šipky reprezentují počet přechodů pohledu mezi oblastmi zájmu.



Obr 9. Výsledek analýzy oblastí zájmů na dvou stimulech experimentu Extinct Village. Úkolem respondentů bylo na leteckém snímku z roku 1947 (vlevo) a 3D modelu (vpravo) nalézt budovu školy.

Závěrem analýzy vybraných stimulů experimentu Extinct Village lze konstatovat, že v případě free-viewing stimulů zobrazujících pohled na obec Čistá z jihovýchodu byl nejmenší počet fixací zjištěn u varianty zobrazující fotorealistický 3D model obce (H1 ověřena). Oproti tomu v případě zobrazení otisku Stablního katastru byl zaznamenán vysoký počet fixací, protože respondenti těkali očima z místa na místo (H2 ověřena). Mezi těmito dvěma variantami stimulu byl pomocí ANOVA nalezen statisticky významný rozdíl u eye-tracking metriky Fixation Duration. Data byla rovněž vizualizována pomocí metody FlowMap. Ve druhé části experimentu byly analyzovány výsledky čtení stimulů, kde bylo úkolem respondentů co nejrychleji nalézt budovu školy. Z analýzy oblastí zájmů vyplynulo, že 3D model na podkladě leteckého snímku byl pro tento úkol vhodnější než samotné zobrazení leteckého snímku (H3 ověřena).

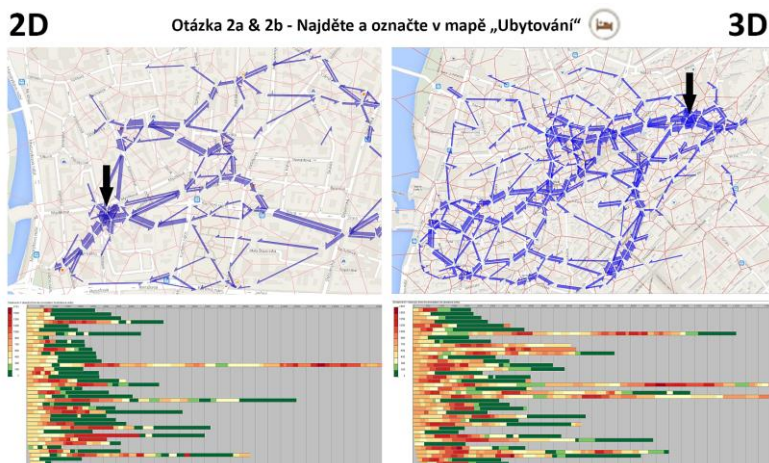
Pro hodnocení nefotorealistické vizualizace měst byl vytvořen eye-tracking experiment 3D Cities, jehož cílem bylo zjistit, zda nefotorealistická vizualizace městské zástavby ovlivňuje uživatelskou percepci mapy při hledání konkrétního místa znázorněného bodovým znakem. Jako stimuly posloužily screenshoty z nejčastěji používaných webových mapových portálů obsahujících nefotorealistickou 3D vizualizaci zástavby. Screenshoty byly doplněny o bodové znaky, které se v mapách měst běžně nacházejí. Úkolem respondentů bylo jeden z těchto znaků v mapě co nejrychleji nalézt a označit pomocí kliknutí myši.

Vždy byly vytvořeny dvě varianty mapy stejného území. První variantou byla běžná mapa, na které jsou budovy a bloky budov znázorněny pomocí plošných znaků. U druhé varianty byly budovy a bloky reprezentovány objekty nefotorealistické 3D (2,5 D) vizualizace. Cílem experimentu bylo ověření následujících hypotéz:

- H1:** Z hlediska estetiky budou respondenti v dotazníku preferovat 3D mapu
- H2:** Z hlediska vhodnosti budou respondenti v dotazníku preferovat 2D mapu
- H3:** Hledání bodového znaku bude nejobtížnější na stimulu č. 9 s nakloněnou mapou
- H4:** Hledání bodového znaku bude jednodušší na 2D variantě stimulů bez 3D budov

Pro statistickou analýzu naměřených eye-tracking dat bylo využito celkem čtyř eye-tracking metrik – Time to Answer, Fixation Count, Fixation Duration Median a Scanpath Length. Nejprve byly testovány rozdíly mezi jednotlivými dvojicemi stimulů. Výsledky testu ukázaly, že největší rozdíl mezi 2D a 3D mapou byl u všech analyzovaných eye-tracking metrik naměřen u dvojice stimulů 9. Vyšší hodnoty metrik byly zaznamenány u 3D mapy, protože ta je v tomto případě skloněná, což negativně ovlivňuje orientaci uživatele.

Dalším krokem při statistické analýze bylo porovnání rozdílů mezi 2D a 3D jako celku za všechny stimuly. Při nezahrnutí dvojice stimulů č. 9 (která výsledky velmi ovlivnila) do statistického srovnání nebyl nalezen statisticky významný rozdíl pro žádnou ze sledovaných eye-tracking metrik.



Obr. 10 Vizualizace naměřených eye-tracking dat pro dvojici stimulů 2 experimentu 3D Cities pomocí metody FlowMap a TimeLine vytvořená v prostředí programu V-Analytics.

Kromě statistické analýzy byla naměřená eye-tracking data vizualizována pomocí metod FlowMap a TimeLine dostupných v aplikaci V-Analytics (Andrienko a kol., 2012).

Výstup metody FlowMap znázorňuje trajektorie pohledu mezi vytvořenými Thiessen polygony agregované za všechny respondenty (obr. 10) pro dvojici stimulů 2. Zobrazené šipky znázorňují celkový počet přesunů pohledu oka mezi jednotlivými Thiessen polygony. Zobrazeny jsou pouze šipky reprezentující tři a více přesunů. U dvojice stimulů 2 bylo výrazně větší množství přesunů pohledu u 3D mapy, což odpovídá statistickému zhodnocení popsanému výše.

Druhou použitou metodou analýzy eye-tracking dat byla metoda TimeLine (obr. 10). Výstup této metody představuje pruhový graf zobrazující data pro jednotlivé respondenty. Na ose X je znázorněn čas a barevnými odstíny jednotlivých segmentů je znázorněna vzdálenost trajektorie oka od zvoleného bodu stimulu. Tím byl v tomto případě hledaný bodový znak. Červená barva představuje nejvyšší vzdálenost pohledu oka od hledaného bodu. Naopak pomocí odstínů zelené barvy je znázorněna situace, kdy vzdálenost pohledu od hledaného znaku nepřesáhla hodnotu 300 px.

Hypotéza, že z hlediska estetiky budou respondenti v krátkém dotazníku vyplňovaném po dokončení eye-tracking experimentu preferovat 3D mapu obsahující vizualizaci budov se nepotvrdila. Z analýzy čtyř eye-tracking metrik pro jednotlivé dvojice zvláště vyplynulo, že největší rozdíl mezi 2D a 3D variantou mapy byl zjištěn v případě dvojice stimulů 9. Zde byla 3D varianta nakloněna a respondenti se v této vizualizaci obtížněji orientovali (H3 ověřena).

U stimulů 1, 4 a 7 byly vyšší hodnoty sledovaných eye-tracking metrik naměřeny u 2D varianty mapy, u zbývajících dvojic map byla vyšší hodnota zaznamenána u 3D varianty. Výsledky vizuální analýzy pomocí metod FlowMap a TimeLine korespondují s těmito zjištěními. V některých případech byla pro hledání bodového znaku vhodnější 2D mapa, v jiných případech její 3D varianta.

Závěrem analýzy experimentu 3D Cities lze konstatovat, že jako nevhodné se ukázalo použití 3D varianty stimulu pocházejícího z portálu F4 Map. Nalezení hledaného bodu na nakloněné vizualizaci bylo pro respondenty velmi obtížné. U ostatních stimulů byla v některých případech vhodnější 2D mapa, v jiných případech 3D mapa. Při analýze všech stimulů dohromady (kromě dvojice 9) nebylo zjištěno, že by typ vizualizace (2D, 3D) statisticky významně ovlivnil uživatelskou percepci. Hypotéza, že hledání bodového znaku bude jednodušší na 2D variantě stimulu (H4) tedy nebyla potvrzena.

6. Případová studie – Tematické 3D mapy

Využití 3D vizualizace pro znázornění reliéfu či městské zástavby je v současné době relativně běžné. Jiná situace je u 3D vizualizace tematického obsahu. Přestože existuje řada metod – Stacks of Point Data, Prism Map, Space-Time-Cube, Informational Landscape a další, nejsou tematické 3D mapy příliš rozšířené. Nevýhody (zejména statické) 3D vizualizace (překrývání, perspektivní zkreslení) se u tematických 3D map projevují výrazněji než například při perspektivním zobrazení reliéfu. Pro eye-tracking hodnocení tematických 3D map byly vybrány dvě metody tematické kartografie:

- Zobrazení areálových znaků
 - Prostorový kartogram (Prism Map)
 - Stínovaný kartogram (Illuminated Choropleth Map)
- Zobrazení bodových znaků
 - 3D bodové znaky v mapě a na virtuálním glóbu

Eye-tracking experiment 3D Thematic – Areals obsahoval dvě části. V první byl porovnáván jednoduchý kartogram a prostorový kartogram. Ve druhé části byl jednoduchý kartogram porovnáván se stínovaným kartogramem.

Prostorový kartogram je označován též jako objemový, Prism Map (Jenks a Caspall, 1971), či stepped statistical surface (Kraak a Ormeling, 2011). Při vizualizaci metodou prostorového kartogramu je intenzita jevu vyjádřena nejen pomocí barvy (či rastru), ale zároveň jsou jednotlivé areály vyvýšeny o příslušnou hodnotu kvantitativní charakteristiky znázorněného jevu.

Použitím stínovaného kartogramu je možné odstranit problémy s překrýváním vyvýšených areálů a perspektivním zkreslením. Tento způsob vizualizace byl představen ve studii Stewarta a Kennelyho (2010). Autor disertační práce autory studie a aplikace SkyLum kontaktoval a aplikaci SkyLum použil pro vytvoření stínovaného kartogramu z dat pro Českou republiku. Použita byla stejná datová sada jako předchozím experimentu.

Cílem experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

H1: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u prostorového kartogramu

H2: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u kartografů

H3: Pro řešení úkolu bude vhodnější prostorový kartogram

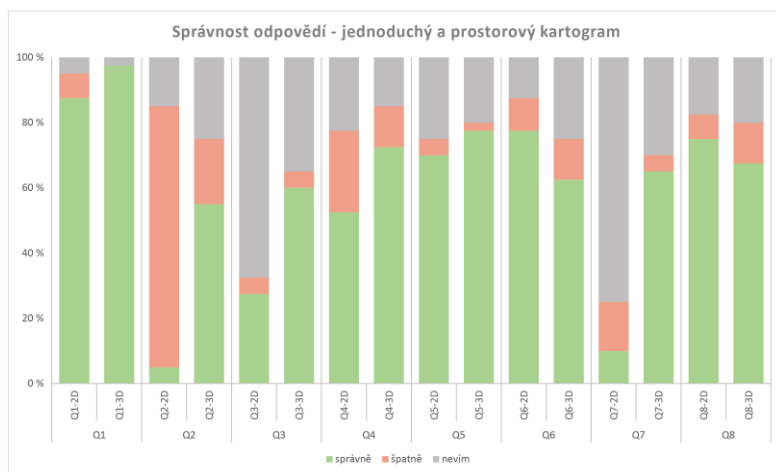
H4: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u stínovaného kartogramu

H5: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u kartografů

H6: Pro řešení úkolu bude vhodnější stínovaný kartogram

Obě části eye-tracking experimentu obsahovaly sadu osmi dvojic stimulů zobrazujících obce České republiky formou jednoduchého a prostorového nebo stínovaného kartogramu. Úkolem respondentů bylo určit, který ze dvou označených areálů obsahuje vyšší hodnotu charakteristiky zobrazeného jevu. V kartogramech byla využita barevná stupnice červené barvy. Při rozdělení dat do nízkého počtu intervalů by byl úkol velmi jednoduchý, proto byla barevná stupnice rozdělena do 254 kategorií. Jedná se tedy o téměř neklasifikovaný kartogram. Pro každou dvojici stimulů byly do prostoru stimulu umístěny dva body označující areály, jejichž hodnotu měli respondenti za úkol porovnat.

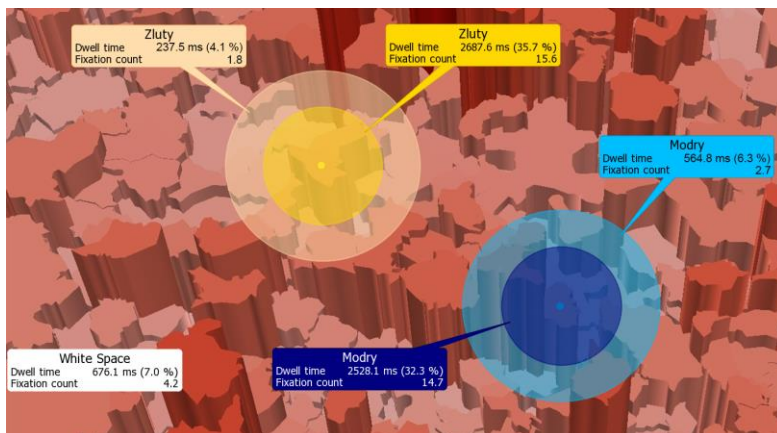
Prvním krokem při analýze dat naměřených nad stimuly s jednoduchých a prostorovým kartogramem bylo hodnocení správnosti odpovědí. Bylo zjištěno, že nejvyšší chybovost byla u dvojice stimulů Q2, kde byly označené polygony umístěny relativně daleko od sebe. U většiny dvojic stimulů byl vyšší počet správných odpovědí zaznamenán pro prostorový kartogram (obr. 11). Nejmarkantnější se tato skutečnost projevila právě u dvojice stimulů Q2, dále pak u dvojice Q7 a Q3. Výjimku tvořily dvojice stimulů Q6 a Q8, nicméně rozdíl nebyl výrazný.



Obr. 11 Odpovědi na dvojice otázek Q1 – Q8 srovnávající jednoduchý (2D) a prostorový (3D) kartogram experimentu 3D Thematic – Areals.

Pro vizualizaci naměřených dat byl využit nástroj Key Performance Indicators programu SMI BeGaze. V okolí označených areálů byly vytvořeny oblasti zájmu. Na obrázku 12 jsou zobrazeny oblasti zájmu na prostorovém kartogramu stimulu Q4. K jednotlivým oblastem zájmu jsou zobrazeny popisné informace obsahující hodnoty Dwell Time a Fixation Count.

Z obrázku je patrné, že z přibližně sedmi sekund (průměrná délka Trial Duration u této otázky) strávili respondenti největší část času v bezprostředním okolí označených areálů. Jednalo se o 35,7 % času v případě žlutě označeného areálu a 32,3 % času u modrého areálu. Vně vyznačené oblasti se respondenti dívali v průměru pouze 676 ms (7 % času). Nízké hodnoty značí, že se respondenti při určování hodnoty jevu řídili převážně porovnáním barev obou areálů. Pokud by porovnávali výšku areálů, byla by zaznamenána vyšší hodnota Dwell Time vně bezprostředního okolí označených areálů.



Obr. 12 Oblasti zájmu vyznačené na stimulu prostorového kartogramu Q4 eye-tracking experimentu 3D Thematic – Areal. U jednotlivých oblastí zájmu jsou vyznačeny hodnoty Dwell Time a Fixation Count.

Po analýze správnosti odpovědí bylo analyzováno pět eye-tracking metrik (Trial Duration, Fixation Count, Fixation Frequency, Fixation Duration a Scanpath Length). Je zajímavé, že při analýze jednotlivých dvojic stimulů bylo nalezeno pouze málo statisticky významných rozdílů. U většiny metrik byly tyto rozdíly zjištěny mezi 2D a 3D variantou stimulů Q2 a Q6. U metriky Fixation Count nebyla ani jedna ze zjištěných hodnot statisticky významná.

Při porovnání jednoduchého a prostorového kartogramu byl vyšší počet správných odpovědí zjištěn u prostorového kartogramu (H1 ověřena). U porovnávání jednoduchého a stínovaného kartogramu byl zjištěn výrazně vyšší počet správných odpovědí než v předchozím případě. Vyšší podíl správných odpovědí byl zaznamenán u 3D varianty, přičemž o statisticky významný rozdíl se jednalo u tří dvojic z osmi (H4 potvrzena). Při statistickém hodnocení rozdílů mezi 2D a 3D variantou pro pět eye-tracking metrik u všech otázek dohromady nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly. Při

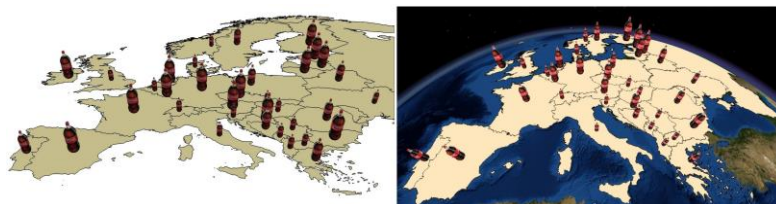
testování každé dvojice otázek zvlášť byly statisticky významné rozdíly u většiny metrik nalezeny pouze u několika dvojic otázek.

Závěrem experimentu 3D Thematic – Arealů lze konstatovat, že prostorový kartogram poskytuje podmínky pro vyšší správnost odpovědí, nicméně respondenti potřebují k řešení úkolu více času. Hypotéza, že stínovaný kartogram je pro rozlišení hodnot charakteristiky zobrazeného jevu vhodnější než jednoduchý kartogram, se nepotvrdila.

Druhou částí případové studie byl eye-tracking experiment 3D Thematic – Points, který obsahoval sadu osmi dvojic stimulů – vizualizaci 3D bodových znaků na mapě a na virtuálním glóbu (obr. 13). V obou případech byla respondentům zobrazena mapa Evropy obsahující 3D bodové znaky reprezentující hodnoty kvantitativní charakteristiky fiktivního jevu. Znaky byly rozděleny do tří velikostních kategorií. Cílem experimentu bylo ověřit následující hypotézy:

H1: Vyšší počet správných odpovědí bude zaznamenán u perspektivního pohledu na mapu

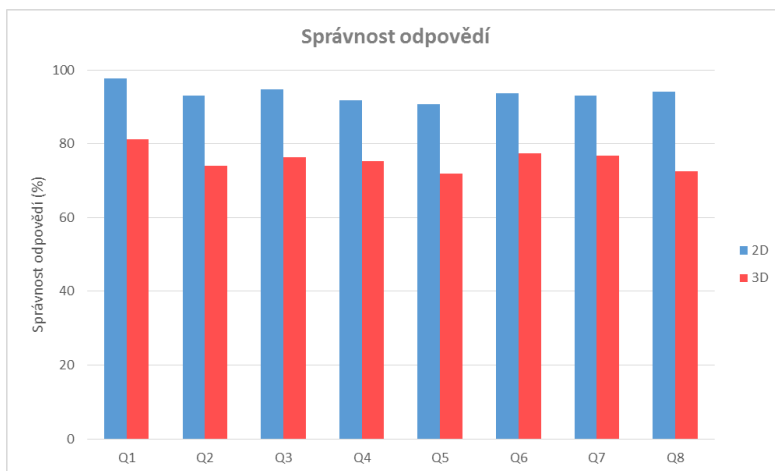
H2: Určení správné velikostní kategorie bodových znaků bude obtížnější u virtuálního glóbu



Obr. 13 Dvojice stimulů Q1 experimentu 3D Thematic – Points. Hodnota charakteristiky fiktivního jevu je vyjádřena pomocí 3D bodových znaků na perspektivním pohledu na mapu (vlevo) a virtuálním glóbu (vpravo)

Prvním krokem při analýze naměřených eye-tracking dat bylo zhodnocení správnosti odpovědí. Úkolem respondentů bylo (pomocí kliku myši přímo do stimulu) označit všechny bodové znaky prostřední velikostní kategorie. Ve všech stimulech byly vytvořeny oblasti zájmu okolo všech bodových znaků a u nich bylo zaznamenáno, zda se jedná o správnou odpověď (znak z prostřední velikostní kategorie) či nikoliv.

U všech otázek byla správnost odpovědí vyšší v případě 2D mapy (obr. 14). Data byla otestována pomocí testu dobré shody a statisticky významné rozdíly byly zjištěny pro všechny dvojice stimulů.



Obr. 14 Správnost odpovědí zaznamenaných během experimentu 3D Thematic – Points. Jako správná odpověď bylo uvažováno označení znaku z prostřední velikostní kategorie a také neoznačení znaku z první nebo třetí kategorie.

Při testování eye-tracking metrik pro každou dvojici stimulů zvlášť byly nalezeny statisticky významné rozdíly u metrik Trial Duration, Fixation Count a Scanpath Length. U metrik Trial Duration a Fixation Count byly statisticky významné rozdíly zjištěny pro všechny dvojice stimulů, u Scanpath Length jen u dvojic Q2, Q6 a Q8.

Hypotézou experimentu bylo, že díky perspektivnímu zobrazení bude určení velikosti znaků obtížnější v případě virtuálního glóbu. Již při samotném eye-tracking testování bylo z reakcí respondentů patrné, že řešení úkolu nad virtuálním glóbem je problematické a zabere větší množství času. Tuto skutečnost potvrdilo hodnocení správnosti odpovědí i analýza eye-tracking metrik.

U všech zkoumaných eye-tracking metrik byly zjištěny vyšší hodnoty v případě virtuálního glóbu. Řešení zadaného úkolu tedy respondentům trvalo déle, bylo u nich zjištěno více fixací a trajektorie pohledu oka byla rovněž delší. Ve všech případech kromě metriky Fixation Frequency byly rozdíly statisticky významné (H2 ověřena).

Lze tedy konstatovat, že rozpoznání velikosti bodového znaku bylo nad 3D stimulem (virtuálním glóbem) pomalejší a současně respondenti mnohem více chybovali než v případě zobrazení znaků nad 2D mapou.

7. Doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii

Při řešení disertační práce bylo navrženo, provedeno a vyhodnoceno sedm eye-tracking experimentů zaměřených na hodnocení různých typů 3D vizualizace. Kromě nich bylo pod vedením autora realizováno velké množství experimentů, které v práci popsány nejsou a které sloužily buď jako krátké výzkumné studie, nebo pouze pro testování možností eye-trackeru a pro sběr testovacích dat. Ve třetím dílčím cíli byly na základě poznatků zjištěných při realizaci těchto experimentů vytvořeny sady doporučení pro eye-tracking testování a pro analýzu eye-tracking dat v kartografickém výzkumu.

Doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu:

1. Preferovat statické obrázky pro stimuly
2. Stimuly řadit v náhodném pořadí
3. Nepřekračovat maximální odchylku kalibrace 0,7°
4. Respondenty s Tracking Ratio nižším než 90 % vyřadit z analýzy
5. Vždy provádět pilotní testování pro odhalení nedostatků připravovaného experimentu
6. Zadání otázky neumisťovat přímo do stimulu, ale na zvláštní stimulus zařazený před vlastním úkolem
7. Zadání otázky volit co nejjednodušší, aby si ho respondenti snadno a přesně zapamatovali
8. Pro rychlejší analýzu odpovědí volit stimulus typu questionnaire
9. Před každým stimulus umístit fixační kříž na dobu 500-600 ms
10. Délkou testování nepřesahovat 15 minut, jinak respondenti neudrží pozornost
11. Do testování zapojit alespoň 30-40 respondentů
12. Preferovat within-subject design
13. Při použití within-subject designu upravovat jednu variantu stimulu pro zamezení efektu učení
14. Neumisťovat dva typy map do jednoho stimulu (více fixací by bylo zaznamenáno v levé části stimulu)

Doporučení pro analýzu eye-tracking dat v kartografickém výzkumu

1. Pro klasifikaci fixací a sakád z naměřených dat při vzorkovací frekvenci nižší než 250 Hz používat algoritmus I-DT
2. Nastavovat v algoritmu I-DT Duration na 80 ms a Dispersion na 50 px
3. Nastavení identifikačního algoritmu ověřit vizuálním porovnáním fixací a prvotních (raw) dat

4. Popsat zvolené nastavení identifikace fixací a sakád v odborných publikacích
5. Metody GazeReplay, Scanpath a Attention Maps využívat zejména pro kontrolu naměřených dat
6. Výstupy metody Space-Time-Cube prezentovat raději v interaktivní podobě
7. Pro analýzu rozdílů strategie čtení stimulů mezi skupinami respondentů využívat metod Scanpath Comparison
8. Pokud lze jednoduše vytvořit oblasti zájmu, využívat metodu String-edit distance, v opačném případě raději metodu PSA
9. V odborných člancích neuvádět výstupy metody Attention Maps bez komentáře
10. Oblasti zájmu definovat větší než vlastní prvek ve stimulu
11. Pro zobrazení agregovaného průběhu trajektorií pohledu všech respondentů preferovat metodu FlowMap
12. Pro rychlejší analýzu dynamického stimulu preferovat manuální analýzu dat před tvorbou dynamických oblastí zájmu
13. Používat často analyzované metriky – Fixation Duration, Total Dwell Time, Fixation Count, Scanpath Length, Time to First Fixation a Trial Duration.
14. Výběr metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat provádět podle vytvořeného rozhodovacího schématu.

8. Výsledky

Dílčí cíle disertační práce byly zaměřeny na výběr a hodnocení metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat v kartografii (DC 1), jejich využití při řešení praktických případových studií v oblasti 3D vizualizace (DC 2) a vytvoření doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu (DC 3).

Výsledky prvního dílčího cíle jsou:

1. Postup pro výběr optimálního nastavení algoritmu I-DT pro detekci fixací a sakád a doporučené hodnoty pro kartografický výzkum
2. Rozhodovací schéma pro výběr vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat
3. Hodnocení metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat podle náročnosti a rychlosti jejich použití

Při řešení druhého dílčího cíle disertační práce byl zkoumán vliv 2D a 3D vizualizace v mapě na její čtení uživatelem. Bylo navrženo, vytvořeno, provedeno a vyhodnoceno sedm eye-tracking experimentů, zaměřených na porovnání uživatelského vnímání 2D a 3D vizualizace pro mapy reliéfu, vizualizace měst a tematické mapy.

Výsledky experimentů zaměřených na 3D reprezentaci reliéfu jsou:

1. Z dotazníkového šetření vyplynulo, že respondenti lépe hodnotí 3D vizualizaci reliéfu
2. Hledání odpovědi na otázku bylo náročnější na 3D vizualizaci reliéfu
3. Při použití stínování v mapě je vhodné zvolit osvětlení ze severozápadu
4. Stínování v turistických mapách se respondentům z estetického hlediska líbilo více
5. Hledání vrcholu nebo obce bylo rychlejší na nestínované variantě turistické mapy
6. Hledání obce na turistické mapě bylo náročnější než hledání vrcholu

Výsledky experimentů zaměřených na 3D reprezentaci měst jsou:

7. Pro vizualizaci zaniklé obce byl pro respondenty nejvhodnější 3D model
8. Respondenti nepreferovali 2D ani 3D variantu map měst z estetického hlediska, pro hledání bodového znaku označili jako vhodnější 2D mapu
9. Respondenti se obtížně orientovali v nakloněné mapě města
10. Typ vizualizace (2D, 3D) městské zástavby neovlivnil uživatelskou percepci mapy při hledání bodového znaku

Výsledky experimentů zaměřených na tematické 3D mapy jsou:

11. U prostorového kartogramu byla správnost odpovědi vyšší, nicméně respondenti potřebovali k řešení úkolu větší množství času
12. Použití stínovaného kartogramu není výhodné
13. Vizualizace bodových znaků nad virtuálním glóblem není výhodná – respondenti byli pomalejší a více chybovali než v případě mapy

Výsledkem třetího dílčího cíle jsou sady doporučení pro eye-tracking výzkum v kartografii. Doporučení byla vytvářena jak pro samotné eye-tracking testování, tak pro analýzu eye-tracking dat.

Výsledky třetího dílčího cíle jsou:

1. Sada čtrnácti doporučení pro eye-tracking testování v kartografickém výzkumu
2. Sada čtrnácti doporučení pro analýzu eye-tracking dat v kartografickém výzkumu

9. Diskuze

V rámci jednotlivých kapitol již byly diskutovány dílčí problémy, které bylo nutné vyřešit. Cílem této kapitoly je popis nejvýznamnějších z těchto problémů a zdůvodnění rozhodnutí, která autor při tvorbě disertační práce učinil.

Pravé 3D vs. 2,5D

Název disertační práce zní „Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybů očí“. Všechny eye-tracking experimenty jsou ale zaměřené na hodnocení pseudo 3D (2,5D) vizualizace, kdy je obraz promítán na plochu monitoru. I přes rychlý vývoj technologií pro zobrazení pravé 3D vizualizace (3D monitory, holografická technologie) je zobrazení na běžném monitoru stále nejčastěji využívané. Záznam pohybu očí při sledování pravého 3D zobrazení by byl s dostupným zařízením (SMI RED 250) velmi obtížný, ne-li nemožný.

Kombinace eye-trackingu a dalších metod studia použitelnosti

Metodu sledování pohybu očí je vhodné kombinovat s dalšími metodami použitelnosti, jako je například dotazník, rozhovor, think-aloud a další. V práci bylo několik experimentů kombinováno s jednoduchým dotazníkem zjišťujícím subjektivní názor respondenta na hodnocený typ vizualizace, případně byl po dokončení testování veden krátký rozhovor o proběhlém testu. V práci bohužel nebyl prostor na hlubší využití dalších metod studií použitelnosti, případně na kombinaci záznamu pohybu očí například se snímáním EEG či měření odporu kůže.

Within-subject vs. between-subject

Jedním z nejzásadnějších rozhodnutí v průběhu práce byla volba mezi within-subject a between-subject designem experimentu. Při within-subject všichni respondenti vidí obě varianty (2D, 3D) stimulů v experimentu. U between-subject designu experimentu jsou respondenti rozděleni do dvou skupin a každé skupině je prezentována pouze jedna varianta stimulu. V práci byl zvolen within-subject design. Tato volba proběhla na základě osobní konzultace autora s Kennethem Holmqvistem z Lund University. Dle této konzultace by při využití between-subject designu byly výsledky více ovlivněny rozdíly mezi uživateli než vlastním typem vizualizace. Jednu z variant stimulu bylo nutné upravit, aby bylo zamezeno efektu učení. Tyto úpravy stimulů byly voleny tak, aby měly co nejmenší vliv na uživatele a bylo možné testovaný typ vizualizace (2D a 3D) porovnat.

10. Závěr

Cílem disertační práce „Hodnocení 3D vizualizací v GIS s využitím sledování pohybu očí“ bylo vyhodnotit vhodnost metod 3D vizualizace pomocí analýzy sedmi eye-tracking experimentů.

K dosažení cíle práce bylo nutné vybrat vhodné metody analýzy a vizualizace eye-tracking dat. Autor představil soubor patnácti metod, které jsou vhodné pro kartografický výzkum. Kromě v eye-tracking výzkumu běžně využívaných způsobů analýzy a vizualizace dat byly do souboru zahrnuty i metody využívající GIS nástroje. Autor všechny metody detailně popsal, otestoval a představil jejich výsledky při analýze či vizualizaci eye-tracking dat naměřených při práci s kartografickými díly.

Výstupem první části práce je optimální nastavení identifikačního algoritmu I-DT pro klasifikaci naměřených eye-tracking dat pro kartografické účely, rozhodovací schéma a hodnocení popsanych metod dle náročnosti a rychlosti použití. Tyto výsledky napomohou dalším výzkumníkům při analýze eye-tracking experimentů pro hodnocení map.

Stěžejní částí práce byl návrh, tvorba, provedení a analýza sedmi eye-tracking experimentů ve třech případových studiích sloužících k analýze rozdílného vnímání 2D a 3D kartografické vizualizace. Jako stimuly byly použity statické obrázky obsahující 2D a 3D vizualizace ze tří tematických oblastí. Hodnocena byla vizualizace reliéfu pomocí vrstevnic, barevné hypsometrie a perspektivních pohledů, fotorealistická a nefotorealistická vizualizace městské zástavby a tematické mapy porovnávající jednoduchý, prostorový a stínovaný kartogram. Výsledkem těchto experimentů byla analýza vhodnosti map pro řešení prostorových úloh provedená pomocí metod popsanych a ohodnocených v první části práce. Naměřená data o pohybu pohledu očí byla statisticky otestována a pomocí vhodných metod vizualizována.

V poslední části práce byly vytvořeny sady doporučení pro kartografický výzkum využívající zařízení pro sledování pohybu očí. Při tvorbě doporučení byly využity zkušenosti získané během eye-tracking experimentů obsažených v disertační práci i dalších studií autora.

Potenciál analýzy pohybu očí při čtení a práci s mapou nebyl v České republice doposud využit. Katedra geoinformatiky je stále jediným kartografickým pracovištěm disponujícím eye-tracking zařízením, a i v evropském měřítku je systematický eye-tracking výzkum v kartografii ojedinělý. Díky klesající ceně profesionálních eye-trackerů a rozmachu levných zařízení je možné v blízké budoucnosti očekávat stále více eye-tracking studií zaměřených na analýzu map

a kartografických děl. Hodnocení použitelnosti 3D vizualizace v kartografii bylo doposud řešeno většinou pomocí dotazníkových šetření. Existuje jen velmi málo studií, hodnotících 3D kartografickou vizualizaci pomocí eye-trackingu.

Při tvorbě disertační práce byly využity poznatky z kartografie a geoinformatiky, ale autor rovněž spolupracoval s odborníky na 3D vizualizaci, studium použitelnosti, eye-tracking a psychologii.

Disertační práce obsahuje v České republice ojedinělý ucelený soubor informací o technologii eye-trackingu, metodách analýzy a vizualizace eye-tracking dat a v neposlední řadě soubor provedených případových studií zkoumající efektivitu 3D vizualizace v kartografii. Z těchto důvodů autor věří, že jeho disertační práce usnadní kartografům počátky práce s eye-tracking zařízením, dopomůže kvalitnímu hodnocení uživatelské percepcce map a také pomůže objasnit efektivitu 3D vizualizace v kartografii.

11. Použité zdroje

ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G. (2006) Exploratory analysis of spatial and temporal data. Springer Berlin, Germany, 704 s.

ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N. (2013) Visual Analytics of Movement. Springer-Verlag Berlin An, 387 s.

ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N., BURCH, M., WEISKOPF, D. (2012) Visual Analytics Methodology for Eye Movement Studies. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18(12), s. 2889-2898.

BLIGNAUT, P. (2009) Fixation identification: The optimum threshold for a dispersion algorithm. Attention, Perception, & Psychophysics, 71(4), s. 881-895.

BRODERSEN, L., ANDERSEN, H. H., WEBER, S. (2002) Applying eye-movement tracking for the study of map perception and map design. National Survey and Cadastre, 98 s.

CARTWRIGHT, W., PETERSON, M. P. (2007) Multimedia cartography. Springer, 546 s.

COLTEKIN, 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, 36(1), s. 5-17.

COLTEKIN, A., FABRIKANT, S., 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, 24(10), s. 1559-1575.

DĚDKOVÁ, P. (2012) 3D vizualizace zaniklé obce a její hodnocení z hlediska uživatelské kognice. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci s. 44.

- GOLDBERG, J. H., KOTVAL, X. P. (1999) Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(6), s. 631-645.
- HARRIS, C. M., HAINLINE, L., ABRAMOV, I., LEMERISE, E., CAMENZULI, C. (1988) The distribution of fixation durations in infants and naive adults. *Vision Research*, 28(3), s. 419-432.
- HERMANS, O., LAARNI, J. (2003) Searching Information from Screen Maps. In *Proceedings of the ScanGIS*, s. 143-156.
- 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 University Press, 537 s.
- JENKS, G. F., CASPALL, F. C. (1971) Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2), s. 217-244.
- KOMOGORTSEV, O. V., JAYARATHNA, S., KOH, D. H., GOWDA, S. M. (2010) Qualitative and quantitative scoring and evaluation of the eye movement classification algorithms. In *Proceedings of the Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, ACM, s. 65-68.
- KRAAK, M.-J., ORMELING, F. (2011) *Cartography: visualization of spatial data*. Guilford Press, 205 s.
- LI, X., ÇÖLTEKİN, A., KRAAK, M.-J. (2010) Visual exploration of eye movement data using the space-time-cube. In *Geographic Information Science*. Springer, s. 295-309.
- OOMS, K., DE MAEYER, P., FACK, V. (2014) Study of the attentive behavior of novice and expert map users using eye tracking. *Cartography and Geographic Information Science*, 41(1), s. 37-54.
- PETROVIČ, D., MAŠERA, P. (2004) Analysis of user's response on 3D cartographic presentations. In *Proceedings of the 7th meeting of the ICA Commission on Mountain Cartography*, s. 1-10.
- PUTTO, K., KETTUNEN, P., TORNIAINEN, J., KRAUSE, C. M., TIINA SARJAKOSKI, L. (2014) Effects of cartographic elevation visualizations and map-reading tasks on eye movements. *The Cartographic Journal*, s. 225-236.
- SAVAGE, D. M., WIEBE, E. N., DEVINE, H. A. (2004) Performance of 2d versus 3d topographic representations for different task types. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications, s. 1793-1797.
- STEWART, J., KENNELLY, P. J. (2010) Illuminated choropleth maps. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(3), s. 513-534.
- VOŽENÍLEK, V. (2005) *Cartography for GIS: Geovisualization and Map Communication*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 142 s.

Odborný životopis autora / Curriculum vitae

OSOBNÍ ÚDAJE / PERSONAL INFORMATION

Jméno / Name	Stanislav Popelka
Bydliště / Adress	Rakodavy 303, 78375, Věrovary
E-mail	standa.popelka@gmail.com
Narozen / Birth	6. 4. 1986, Přerov



VZDĚLÁNÍ / EDUCATION

2010–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, doktorské studium , obor <i>Geoinformatika a kartografie / PhD study Geoinformatics and Cartography</i>
2008–2010	Univerzita Palackého v Olomouci, navazující Mgr. studium , obor <i>Geoinformatika / Master's degree: specialization Geoinformatics</i>
2005–2008	Univerzita Palackého v Olomouci, Bc. studium , obor <i>Geografie-Geoinformatika / Bachelor's degree: Geography–Geoinformatics</i>

PRAXE / EXPERIENCE

2015–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt OP VK StatGIS team (vědecký pracovník / researcher) <i>Budování výzkumně-vzdělávacího týmu v oblasti modelování přírodních jevů a využití geoinformačních systémů, s vazbou na zapojení do mezinárodních sítí a programů</i>
2012–2015	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt OP VK InDOG (koordinátor / coordinator) <i>Inovace doktorského studia Geoinformatika a kartografie podporou moderních technologických směrů</i>
2012–2014	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt VaVpI Pevnost Poznání (GIS specialista / GIS specialist) <i>Odborný pracovník sekce Voda v Krajině, tvorba exponátů s kartografickou tematikou</i>
2011–2013	gisportal.cz (editor / editor)
2010–2011	GeoBusiness (editor / editor)
2008–2012	MOF's s.r.o (3D modelář / 3D modeller) <i>Tvorba 3D modelů historických budov, tvorba mapových výstupů</i>

VÝUKOVÉ AKTIVITY / TEACHING

2010–dosud	cvičení na Katedře geoinformatiky UP: Tematická kartografie, Počítačová kartografie, Webová kartografie, Kartografický projekt, Programové prostředky GIS <i>seminars of: Thematic Cartography, Digital Cartography, Web Cartography, Cartographic Project, GIS</i>
------------	--

2014	Ghent University, Belgium
2013	Delft University, Netherlands
2013	Lund University, Sweden
2012	Ghent University, Belgium
2011	University of Prishtina, Kosovo

Seznam vybraných publikací autora souvisejících s disertační prací / Author's selected publications related to the dissertation

Publikace v odborném časopise v databázi Web of Science (Jimp)

Publications in a scientific journal indexed on the Web of Science (Jimp)

- **Popelka, S.**, Brychtová, A. (2013): Eye-tracking Study on Different Perception of 2D and 3D Terrain Visualisation. The Cartographic Journal, Vol. 50 No. 3, Maney Publishing, s. 240-246.

Publikace v recenzovaném časopise ve světově uznávané databázi (Scopus) (Jneimp)

Publications in a scientific journal indexed on other world database (Scopus) (Jneimp)

- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Voženílek, V. (2012): Eye-tracking a jeho využití při hodnocení map. Geografický časopis Geografický ústav SAV, s. 71-87.

Kapitola v odborné knize (C) / Chapter in a scientific book (C)

- **Popelka, S.**, Dolezalova, J. (2015): Non-photorealistic 3D Visualization in City Maps: An Eye-Tracking Study. Modern Trends in Cartography, Springer International Publishing, s. 357-367.
- **Popelka, S.**, Dedkova, P. (2014): Extinct Village 3D Visualization and its Evaluation with Eye-Movement Recording. ICCSA 2014 - Lecture Notes in Computer Science Volume 8579 Springer International Publishing, 10 s.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Brus, J. (2012): Advanced Map Optimization Based on Eye-tracking. Ed.: Carlos Bateira, Cartography InTech, Rieka, Croatia, 312 s.

Publikace v konferenčním sborníku v databázi ISI Proceedings (D)

Papers in conference proceedings on the database ISI Proceedings (D)

- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Svobodová, J., Brus, J., Doležal, J. (2013): Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking. 21st International Conference on Geoinformatics (GEOINFORMATICS), IEEE Xplore, 6 s.
- **Popelka, S.**, Dvorsky, J., Brychtova, A., Hanzelka, J. (2013): User typology based on eye-movement paths. SGEM 2013 Conference Proceedings, Volume I, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1049.

- **Popelka, S.**, Voženílek, V. (2012): Specifying of Requirements for Spatio-Temporal Data in Map by Eye-Tracking and Space-Time-Cube. Proceedings of International Conference on Graphic and Image Processing, Singapore, 5 s.
- Brychtová, A., **Popelka, S.**, Dobešová, Z. (2012): Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles. SGEM 2012 Conference Proceedings Volume II STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1048.
- Brychtová, A., **Popelka, S.**, Voženílek, V. (2012): The analysis of eye movement as a tool for evaluation of maps and graphical outputs from GIS. Geography and Geoinformatics: Challenges for practise and education, Masarykova univerzita, s. 154-163.

Publikace v konferenčním sborníku v databázi Scopus (D)

Papers in conference proceedings on the database Scopus (D)

- **Popelka, S.** (2014): The Role of Hill-Shading in Tourist Maps. Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (ET4S 2014), CEUR-WS, 5 s.
- **Popelka, S.**, Vavra, A., Pechanec, V., Netek, R. (2014): E-learning Portal Functionality Assesment with the use of Eye-tracking Experiment. Proceedings of the 9th International Conference on e-Learning, ACPI, s. 228-237.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Svobodová, J., Brus, J., Doležal, J. (2013): Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking. 21st International Conference on Geoinformatics (GEOINFORMATICS), IEEE Xplore, 6s.
- **Popelka, S.**, Dvorsky, J., Brychtova, A., Hanzelka, J. (2013): User typology based on eye-movement paths. SGEM 2013 Conference Proceedings Volume I STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1049.
- **Popelka, S.**, Voženílek, V. (2012): Specifying of Requirements for Spatio-Temporal Data in Map by Eye-Tracking and Space-Time-Cube. Proceedings of International Conference on Graphic and Image Processing, Singapore, 5 s.
- Brychtová, A., **Popelka, S.**, Dobešová, Z. (2012): Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles. SGEM 2012 Conference Proceedings, Volume II, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, s. 1041-1048.

Publikace v konferenčním sborníku domácí (ostatní)

Papers in conference proceedings – Czech (other)

- **Popelka, S.**, Vávra, A., Brychtová, A. (2014): Eye-tracking hodnocení fenologických map. Aktivity v kartografii - zborník referátov, Kartografická spoločnosť SR, 9 s.
- Dědková, P., **Popelka, S.** (2014): 3D model zaniklé obce Čistá a jeho hodnocení metodou eye-trackingu. Sborník abstraktů příspěvků ze semináře Geomatika v projektech 2014, s. 20-21.
- Brychtová, A., **Popelka, S.** (2012): Eye-tracking v kartografii. Aktivity v kartografii, Kartografická spoločnosť Slovenskej republiky, s. 20-28.

Publikace v konferenčním sborníku zahraniční (ostatní)

Papers in conference proceedings – foreign (other)

- **Popelka, S.** (2014): Optimal eye fixation detection settings for cartographic purposes. SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings, Volume I, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 8 s.
- Vondrakova, A., **Popelka, S.** (2014): The use of eye-tracking for the evaluation of various cartographic tasks. SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings, Volume III, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 8 s.
- **Popelka, S.** (2014): The role of hill-shading in tourist maps: an eye-tracking study. Third InDOG doctoral conference, Vydavatelství UP, 4 s.
- **Popelka, S.** (2013): Eye-tracking study on different types of 3D visualization. Second InDOG doctoral conference, Vydavatelství UP, 4 s.
- **Popelka, S.**, Brus, J., Dědková, P. (2013): 3D Visualization of Extinct Village and its Evaluation using Eye-tracking. Proceedings of the 12 th SEASC: Geospatial Cooperation Towards a Sustainable Future ASEAN FLAG, 6 s.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A. (2013): Eye-tracking experiment on 3D thematic maps. AGILE 2013 Workshop - Analysing eye-tracking data in real, virtual and mixed environments Leuven University, 2 s.
- **Popelka, S.** (2012): Space-Time-Cube for Visualization of Eye-tracking data. First InDOG doctoral conference, Vydavatelství UP, 4 s.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A., Brus, J. (2012): Evaluation of user preferences during reading of 2D and 3D cartographic visualizations. Conference Proceedings SWAET 2012, The Scandinavian Workshop on Applied Eye Tracking Karolinska Institutet, Stockholm, s. 39.
- **Popelka, S.**, Brus, J. (2011): Space-Time-Cube visualization of Eye-tracking data. Proceedings of EyeTrackBehavior 2011 - Tobii Eye Tracking Conference on Behavioral Research, Frankfurt am Main, Tobii, s. 30.

Ostatní publikace autora / Another author's publications

Zahraníční publikace / Foreign publications

- Brus, J., Voženílek, V., **Popelka, S.** (2013): An Assessment of Quantitative Uncertainty Visualization Methods for Interpolated Meteorological Data. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013 Proceedings, Part IV Springer Heidelberg Dordrecht London New York, s. 166-179. (**WoS, Scopus**)
- Brus, J., Burian, J., **Popelka, S.** (2013): Visualization of uncertainty in determining the rate of suburbanizati on the example of the Olomouc city. Proceedings of the 12th SEASC: Geospatial Cooperation Towards a Sustainable Future ASEAN FLAG, 6 s.
- Brus, J., **Popelka, S.**, Brychtova, A., Svobodova, J. (2012): Exploring Effectiveness of Uncertainty Visualization Methods by Eye-Tracking. Symposium proceedings Accuracy 2012, 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Science Florianópolis, Brazil, s. 215-220.

- **Popelka, S.**, Brychtová, A. (2012): The historical 3D map of lost Olomouc fortress creation. *Geography and Geoinformatics: Challenges for practise and education Masarykova univerzita*, 7 s. (**WoS**)
- **Popelka, S.**, Brychtová, A. (2011): Olomouc - Possibilities of geovisualiation of the historical city. *Geoinformatics FCE CTU, Volume 6 Geoinformatics, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague*, s. 267-274.
- Brychtová, A., **Popelka, S.** (2011): Visualization of spatio-temporal changes of the Olomouc city. In *Proceedings of 6th international workshop Digital approaches to Cartographic heritage ICC, Haag, Netherlands*, 18 s.
- **Popelka S.** (2011): Visibility analyses and their visualization. *Proceedings Symposium GIS Ostrava VSB TU Ostrava*, 10 s.
- **Popelka, S.**, Voženílek, V. (2010): Landscape visibility analyses and their visualisation. *ISPRS Archives, WebMGS 2010, Como, Italy Politecnico di Milano*, 6 s. (**Scopus**)

Domáci publikace / Czech publications

- Dobešová, Z., Burian, J., Miřijovský, J., Vávra, A., Néték, R., **Popelka, S.** (2013): Tvorba geografického informačního systému malého území. *Univerzita Pačkého, Olomouc*, 106 s.
- **Popelka, S.**, Brychtová, A. (2011): Metody virtuální rekonstrukce zaniklé pevnosti Olomouc. *Historická geografie 37/2 Historický ústav AVČR, Praha*, s. 213-230.
- Brychtová, A., **Popelka, S.** (2011): Kartometrická analýza raportního plánu Tereziánské pevnosti Olomouc. *Zborník recenzovaných příspěvkov, Univerzita Komenského, Bratislava*, 6 s.

1. Annotation

The aim of the thesis was to evaluate 3D visualization using analyses of seven eye-tracking experiments.

The first part of the thesis was focused on the selection of the most appropriate settings of the identification algorithm for data classification to the fixation and saccades. Another part of the first sub-goal was classification, description and presentation of outputs of fifteen methods for analysis and visualization of eye-tracking data suitable for cartographic research. The result of the sub-goal is the decision tree for the selection of the best suitable method and the assessment of described methods in terms of the difficulty of the method and the speed of its use. These outputs can be used for the selection of appropriate methods of analysis and visualization of eye-tracking data in future cartographic experiments.

The goal of the second sub-goal was design, creation, and analysis of seven eye-tracking experiments aimed at analysing the difference in the perception of 2D and 3D cartographic visualization. Evaluation of the experiments was carried out using the methods described and evaluated in the first part. Three thematic areas in which 3D visualization is used were selected for evaluation. It was a visualization of the relief, visualization of the urban areas and thematic 3D maps.

The result of the third sub-goal is a set of recommendations for eye-tracking testing and analysing of the eye-tracking data in cartographic research. A sets of recommendations were made based on the author's experience of the creation, and analyses of eye-tracking experiments in the dissertation, as well as from other conducted experiments.

Analysis of eye movements during reading and working with the map was not used in the Czech Republic before. With the decreasing cost of professional eye-trackers and boom of low-cost eye-trackers, more cartographic eye-tracking studies are expected in the near future. Author believes that his Ph.D. thesis will facilitate the beginnings of cartographers work with eye-tracking devices, will help to assessment of the user perception of maps and will also help to clarify the effectiveness of 3D visualization in cartography.

Keywords:

Cartography, eye-tracking, eye-movements, 3D, visualization

2. Summary

The aim of the thesis "Evaluation of 3D visualization in GIS using eye-tracking" was to evaluate 3D visualization using analyses of seven eye-tracking experiments.

Today, two-dimensional perspective images are usually considered as 3D methods of (cartographic) visualization (Voženilek, 2005). These perspective views applied to various types of cartographic data are the most common type of stimuli evaluated in the dissertation thesis. Perspective views are 3D visual representation of data, displayed on a 2D plane of the computer screen.

Large number of methods of analysis and visualization of eye-tracking data exists, but not all are suitable for the analysis of eye movements recorded during a presentation of cartographic stimuli. Suitable methods were described in detail, and their possibilities were presented on the example of cartographic tasks. In addition to the common eye-tracking analysis and visualization methods, the set also contains the methods from the field of GIS. The final decision scheme provides a guidance during the selection of a specific method of analysis and visualization of eye-tracking data in cartographic research.

The most suitable methods of analysis and visualization were applied to the data measured in seven eye-tracking experiments focused on differences in the perception of different 3D visualization techniques used in cartography.

In the last part of the thesis, the findings of the possibilities and limitations of eye-tracking in cartographic research were summarized in the set of recommendations.

The aims of the thesis were divided into three parts:

Aim 1 – Analysis of the suitability of methods for analysis of eye-tracking data

Aim 2 – Design, creation and analyses of eye-tracking experiments

Aim 3 – Recommendations for eye-tracking research in cartography

Aim 1 – Analysis of the suitability of methods for analysis of eye-tracking data

The first aim was focused on the selection the most appropriate settings of I-DT identification algorithm. Other parts of aim 1 were classification, description and practical presentation of eye-tracking data analyses methods. Fifteen methods divided into seven categories were selected:

- Visualization of trajectories – GazeReplay, Scanpath, Space-Time-Cube
- Scanpath comparison
- Attention maps
- Areas of Interest – AOI Transitions, Gridded AOI, Sequence Chart, Binning Chart
- GIS analyses in V-Analytics software – FlowMap, TimeLine
- Manual analysis of eye-tracking data
- Statistical analysis – eye-tracking metrics

The result of aim 1 is a description of 15 selected methods for analysis and visualization of eye-tracking data, decision tree for selection of the most suitable method and evaluation of the methods depending on the complexity and speed of use. Decision tree and evaluation of methods can be used in future cartographic experiments.



Fig. 1 Decision scheme for selection of methods for the analysis of eye-tracking data

Results of Aim 1 are:

1. The procedure for selecting the optimal settings of I-DT algorithm for the detection of fixations and saccades and recommended threshold values for cartographic research
2. Decision scheme for selection of a suitable method of analysis and visualization of eye-tracking data
3. Evaluation of eye-tracking data analysis and visualization methods according to the complexity and speed of use

Aim 2 – Design, creation and analyses of eye-tracking experiments

The content of the second aim was to design, creation and analyses of seven eye-tracking experiments focused on analysing the difference in the perception of 2D and 3D cartographic visualization. Data recorded during experiments were analysed with the use of methods described in the first aim. Output of aim 2 is a set of seven experiments (Table. 1), recorded data and commented results of individual experiments.

Table. 2 Experiments created in dissertation thesis

	Experiment	Topic	Method
Aim 2a Relief	DualMap	Perspective views	Eye-tracking + questionnaire
	SingleMap	Perspective views	Eye-tracking
	Shading – Mapy.cz	Shading	Eye-tracking + questionnaire
Aim 2b Cities	Extinct Village	Photorealistic visualization of village	Eye-tracking
	3D Cities	Non-photorealistic visualization of cities	Eye-tracking + questionnaire
Aim 2c Thematic	Thematic 3D – Arealas	Thematic 3D maps – Prism map and Illuminated Choropleth Map	Eye-tracking
	Thematic 3D - Points	Thematic 3D maps – 3D points on map and virtual globe	Eye-tracking

Results of experiments focused on the 3D representation of the relief are:

4. The questionnaire results showed that respondents evaluate better 3D visualization of relief
5. When using shading, the light should come from the northwest
6. Respondents preferred shading in tourist maps from the aesthetic point of view
7. Finding the hill or the village was faster on the unshaded tourist map
8. Finding the village on the tourist map was more difficult than finding the hill

Results of experiments focused on the 3D representation of cities are:

9. 3D model was the best for visualization of the extinct village
10. Respondents did not prefer 2D or 3D variant of map from the aesthetic point of view, for the finding of point symbol they prefer 2D map
11. Orientation in the tilted city map was problematic for respondents
12. Type of visualization (2D, 3D) in city maps did not affect user perception during finding of the point symbol

Results of experiments focused on the 3D thematic maps are:

13. The correctness of answers was better in case of Prism map, but respondents needed more time for the answer
14. The use of shaded choropleth map is not advantageous
15. Visualization of point symbols on a virtual globe is not advantageous – respondents were slower and made more mistakes

Aim 3 – Recommendations for eye-tracking research in cartography

The result of the third aim was a set of recommendations for eye-tracking testing and analyses of eye-tracking data in cartographic research. A set of recommendations was created based on the author's experience with the design, creation and analyses of seven eye-tracking experiments (Aim 2), as well as from other experiments conducted by author as a short research studies.

Results of Aim 3 are:

16. Set of fourteen recommendations for eye-tracking testing in cartographic research
17. Set fourteen recommendations for analyses of eye-tracking data in cartographic research

Conclusion

The aim of the thesis "Evaluation of 3D visualization in GIS using eye-tracking" was to evaluate 3D visualization using analyses of seven eye-tracking experiments.

To achieve the objective of this work, selection of appropriate methods of analysis and visualization of eye-tracking data was necessary. The author presented a set of fifteen methods suitable for cartographic research. In addition to the common eye-tracking analysis and visualization methods, the set also contains the methods from the field of GIS. All methods were described in detail, tested, and their results were presented during analyses of eye-tracking data measured on the stimuli with cartographic works.

The output of the first part of the dissertation is the optimal setting for the identification algorithm I-DT for cartographic purposes, decision tree for the selection of the best suitable method and the assessment of described methods in terms of the difficulty of the method and the speed of its use.

Crucial part of the dissertation was design, creation, and analysis of seven eye-tracking experiments. These experiments were used in three case studies aimed at analyses of the difference in the perception of 2D and 3D cartographic visualization. As stimuli, static images containing 2D and 3D visualization from three thematic areas were used. Relief visualization with the use of contour lines,

hypsoetry and perspective views was evaluated, as well as photorealistic and non-photorealistic urban maps. The last two experiments were focused on the comparison of simple choropleth map, prism map, and shaded choropleth map. The result of these experiments was the analysis of the suitability of the maps for solving spatial tasks. Eye-tracking data were statistically tested, visualised and analysed with the use of methods described and evaluated in the first part of the thesis.

In the last part of the thesis, sets of recommendations for cartographic eye-tracking research were created. Recommendations were formulated according to experiences gained during eye-tracking experiments described in the thesis and other studies of the author.

Analysis of eye movements during reading and working with the map was not used in the Czech Republic before. Department of Geoinformatics at Palacký University is still the only Czech cartographic department using eye-tracking devices, and even in European scale, systematic eye-tracking research in cartography is rare. With the decreasing cost of professional eye-trackers and boom of low-cost eye-trackers, more cartographic eye-tracking studies are expected in the near future. Eye-tracking evaluation of 3D visualization in cartography has so far been mostly solved by using of questionnaire surveys. There are very few studies evaluating 3D cartographic visualization with the use of eye-tracking.

Knowledge from Cartography and Geoinformatics was used during the creation of the dissertation, but the author also collaborated with experts in 3D visualization, usability studies, eye-tracking and psychology.

This thesis consists unique, comprehensive set of information about eye-tracking technology, methods of analysis and visualization of cartographic eye-tracking data. Crucial part of the thesis is a set of case studies examining the effectiveness of 3D visualization in cartography. For these reasons, author believes that his Ph.D. thesis will facilitate the beginnings of cartographers work with eye-tracking devices, will help to assessment of the user perception of maps and will also help to clarify the effectiveness of 3D visualization in cartography.

Mgr. Stanislav Popelka

HODNOCENÍ 3D VIZUALIZACÍ V GIS S VYUŽITÍM SLEDOVÁNÍ POHYBU OČÍ
EVALUATION OF 3D VISUALIZATION IN GIS USING EYE-TRACKING

Určeno pro studenty, partnerská akademická pracoviště a veřejnost.

Výkonný redaktor prof. RNDr. Zdeněk Dvořák, DrSc. et Ph.D.
Odpovědná redaktorka Mgr. Věra Krischková
Technická redakce Mgr. Stanislav Popelka

Publikace neprošla redakční jazykovou úpravou.

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci
Křížkovského 8, 771 47 Olomouc
www.vydavatelstvi.upol.cz
www.e-shop.upol.cz
vup@upol.cz

1. vydání
Olomouc 2015
Edice GEOINFO-CARTO-THESIS, svazek IX.
ISSN 1805-7500
ISBN 978-80-244-4549-6

Neprodejná publikace