

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky



Studijní program: P1301 Geografie

Obor: Geoinformatika a kartografie

BAREVNÁ VZDÁLENOST V KARTOGRAFII

Mgr. Alžběta Brychtová

Disertační práce

Školitel: Prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Olomouc 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci doktorského studia oboru Geoinformatika a kartografie vypracovala samostatně pod vedením prof. RNDr. Víta Voženílka, CSc.

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

V Olomouci

OBSAH

1	Cíle práce.....	5
DC1	Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi	5
DC2	Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti.....	6
DC3	Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic	6
2	Metody a postup zpracování.....	7
2.1	DC1 Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi	7
2.2	DC2 Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti.....	9
2.2.1	Experimentální stimuly.....	9
2.2.2	Barevnost stimulů.....	10
2.2.3	Průběh experimentů.....	11
2.2.4	Sledované závislé proměnné a jejich interpretace	13
2.2.5	Použitý HW a SW.....	14
2.2.6	Použité statistické testy a jejich interpretace.....	15
2.3	DC3 Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic.....	16
3	Teorie barevné vzdálenosti (současný stav).....	17
3.1	Hodnocení čitelnosti map.....	17
3.2	Zařazení barevné vzdálenosti do konceptu vizuální vzdálenosti.....	19
3.3	Barevné modely a prostory.....	21
3.3.1	Způsoby specifikace barev.....	21
3.3.2	Specifika vybraných barevných modelů a prostorů.....	22
3.3.3	Specifikace barev odpovídající lidskému vnímání	23
3.4	Metody výpočtu barevné vzdálenosti	29
3.5	System správy barev	31
4	DC1-Barevná vzdálenost v Kartografické praxi.....	34
4.1	Experiences: Výzkum současných postupů při tvorbě map	34
4.1.1	Metody	34
4.1.2	Účastníci dotazníku.....	36
4.1.3	Výsledky dotazníkového šetření.....	36
4.1.4	Shrnutí.....	40
4.2	ColMan: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map	41
4.3	ColDist: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0	43

5	DC2-Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti	49
5.1	Labels: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na čitelnost popisu v mapách	51
5.1.1	Metody	51
5.1.2	Výsledky.....	55
5.1.3	Závěr.....	61
5.2	Schemes: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost.....	62
5.2.1	Metody	62
5.2.2	Výsledky.....	66
5.2.3	Závěr.....	73
5.3	Euclid: Vliv vzdálenost znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení.....	74
5.3.1	Metody	74
5.3.2	Výsledky.....	76
5.3.3	Závěr.....	85
5.4	Order: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy .	86
5.4.1	Metody	86
5.4.2	Výsledky.....	88
5.4.3	Závěr.....	90
5.5	Optimization: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic...	91
5.5.1	Metody	91
5.5.2	Výsledky.....	93
5.5.3	Závěr.....	95
5.6	Hue: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy.....	96
5.6.1	Metody	96
5.6.2	Výsledky.....	98
5.6.3	Závěr.....	99
6	DC3-Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic.....	100
6.1	Nástroj Sequential Color Scheme Generator 1.0.....	100
6.2	Doporučená manipulace s barvami na mapách	106
6.2.1	Doporučený postup tvorby statických map pro prohlížení na internetu	106
6.2.2	Doporučený postup tvorby map pro tisk	108
7	Výsledky	110
7.1	DC1-Barevná vzdálenost v kartografické praxi.....	110
7.2	DC2-Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti.....	111
7.3	DC3-Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic	114
8	Diskuze	115
9	Závěr	119
	Použitá literatura a informační zdroje.....	120
	Summary.....	127
	Poděkování.....	128

1 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je výzkum vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost vizualizované prostorové informace v mapě. v teoretické rovině je výzkum zaměřen na zpřesnění definice barevné vzdálenosti v procesu čtení mapy. V praktické rovině zahrnuje experimentální ověření předpokladů o percepci map v souvislosti s barevnou vzdáleností.

V disertační práci byla barevná vzdálenost začleněna do konceptu vizuální vzdálenosti, byly stanoveny podmínky a metody měření barevné vzdálenosti a prostřednictvím výzkumných metod kognitivní kartografie provedeny experimentální studie vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost mapového obsahu.

Snahou autorky bylo přispět k rozvoji moderní kartografie zodpovězením vybraných výzkumných otázek:

- Co je barevná vzdálenost a jaký je její vztah k vizuální vzdálenosti?
- Jaké jsou metody měření barevné vzdálenosti?
- Jak změna barevné vzdálenosti ovlivňuje čitelnost mapy?
- Existuje kritická efektivní hodnota barevné vzdálenosti pro kartografické vyjadřování?

Cíl disertační práce byl plněn řešením následujících tří dílčích cílů (DC):

DC1 Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi

V rámci prvního dílčího cíle byly kvalitativně zkoumány současné postupy, které jsou v praxi uplatňovány zkušenými kartografy při práci s barvami na mapách, bez ohledu na ustálená pravidla metod kartografické vizualizace. Dále proběhlo hodnocení systému správy barev v programech, které se používají pro tvorbu map, v internetových prohlížečích a eye-tracking programech pro tvorbu experimentů. Byla provedena analýza barevných schémat nástroje ColorBrewer 2.0, z níž byly vyvozeny parametry, které se staly základem pro vlastní experimentální výzkum.

Celkem byly provedeny tři studie:

1. *Experiences*: Výzkum současných postupů při tvorbě map
2. *ColMan*: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map
3. *ColDist*: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

DC2 Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti

Druhý dílčí cíl představuje nejdůležitější část disertační práce. V průběhu jeho řešení byly metodami kvantitativního výzkumu současné kognitivní kartografie (dotazníkové šetření a eye-tracking výzkum) ověřovány předpoklady o vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost map. Součástí podcíle bylo provedení a vyhodnocení šesti experimentálních studií uživatelské percepce.

Celkem bylo provedeno následujících šest experimentů:

1. *Labels*: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti fontu na čitelnost popisu
2. *Schemes*: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost
3. *Euclid*: Vliv vzdálenosti znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení
4. *Order*: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy
5. *Optimization*: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic
6. *Hue*: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

DC3 Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic

Třetím dílčím cílem bylo navrhnout a vytvořit aplikaci umožňující konstrukci barevných stupnic způsobem, který vychází z výsledků a výstupů experimentálního testování. Součástí byl i návrh doporučeného postupu pro práci s barvami na mapách, který zabezpečí konzistentní barevnost výstupů v digitálním i analogovém prostředí.

2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Plnění cílů disertační práce předcházely rozsáhlý teoretický rozbor zaměřený na postihnutí souvislostí mezi čitelností mapy, vizuální a barevnou vzdáleností. Byla vymezena terminologie problematiky barevných modelů a prostorů, včetně uvedení jejich přehledu a vhodnosti pro výpočet barevné vzdálenosti, která odpovídá percepci lidského jedince s normálním barevným viděním. Na základě studia odborné literatury byla vybrána a specifikována metoda výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000. v poslední řadě byl definován systém správy barev a jeho význam v kartografické vizualizaci.

Cíl disertační práce byl plněn řešením tří dílčích cílů. Použité metody a postupy vedoucí k jejich naplnění jsou uvedeny níže pro každý z dílčích cílů zvlášť.

2.1 DC1 Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi

Studiem odborné literatury bylo zjištěno, že problematika barevné vzdálenosti nebyla doposud při hodnocení čitelnosti map zkoumána. Hlavním východiskem prvního dílčího cíle bylo poskytnout vlastnímu základnímu výzkumu teoreticko-praktický základ formou získání představy o současných aplikovaných postupech v moderním kartografickém designu a technologických možnostech zobrazování digitálních map s důrazem na jejich barevnost.

Řešení prvního dílčího cíle bylo rozděleno do tří fází:

V první fázi byl proveden *kvalitativní výzkum* s cílem zjistit současné postupy, které jsou v praxi uplatňovány zkušenými kartografy při práci s barvami na mapách, bez ohledu na ustálená pravidla metod kartografické vizualizace. Hlavní motivací bylo postihnout metodiku, kterou zkušení kartografové uplatňují při práci s barvami na mapách.

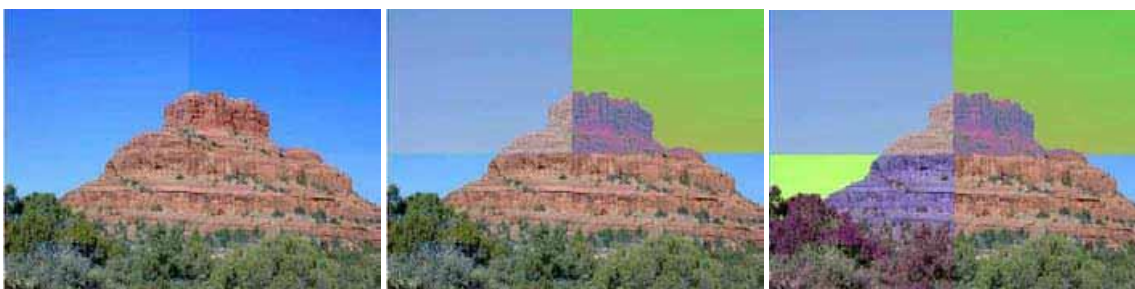
Obecně je cílem kvalitativního výzkumu porozumět zkoumanému problému, jednotlivcům, nebo skupinám v jejich přirozeném prostředí (Klener, 1996). Výstupem je zpráva obsahující názory respondentů a komplexní popis a výklad problému včetně vyjádření výzkumníka; výsledky kvalitativního výzkumu mohou signalizovat nutnost hlubšího zkoumání problému (Creswell, 1997). Výsledky kvalitativního výzkumu je velmi problematické zobecňovat na celou populaci. Přestože je možné získat hloubková data, je téměř nereálné dosáhnout vysokého počtu zkoumaných jednotek (Klener, 1996).

Podle Creswella (1997) existuje pět typů designu kvalitativního výzkumu: narativní (nebo biografický) výzkum, fenomenologický výzkum, zakotvená teorie, etnografický výzkum a případová studie. v disertační práci byl aplikován *fenomenologický výzkum*, jehož cílem je *porozumět podstatě prožité zkušenosti nebo poznatkům* (v tomto případě porozumět současným postupům v kartografii), *prostřednictvím studia jednotlivců*, kteří sdílí prožité zkušenosti nebo poznatky (v tomto případě zkušenosti kartografové). Při fenomenologickém výzkumu se primárně používá metoda rozhovoru (Creswell, 1997). Protože nebylo možné se setkat se všemi účastníky osobně, vlastní výzkum byl proveden formou *dotazníkového šetření* s použitím otevřených, výběrových, stupnicových a dichotomických (uzavřených) otázek (klasifikace otázek podle Wilkinson a Birminghama (2003)).

Snahou bylo umožnit respondentům vyjádřit se k tématu vlastními slovy a suplovat tak možnosti řízeného rozhovoru. Dotazník byl proveden v angličtině. Pro tvorbu, distribuci dotazníkového formuláře i sběr dat byla použita technologie Google Forms.

Dále proběhlo *hodnocení systému správy barev* v programech pro tvorbu map, internetových prohlížečích a programech pro přípravu eye-tracking experimentů.

Hodnocení vybraných programů proběhlo testem, který poskytuje Mezinárodní konsorcium pro barvu (z angl. *International Color Consortium, ICC*) (Borg, 2003). Test obsahuje obrázek rozdělený na 4 kvadranty, každý s jiným barevným profilem ve verzi 2 a 4. Tyto kvadranty je třeba zobrazit v prostředí testovaného programu a podle jejich vizuální podoby (obr. 1) lze posoudit, zda předmětný program profily podporuje.

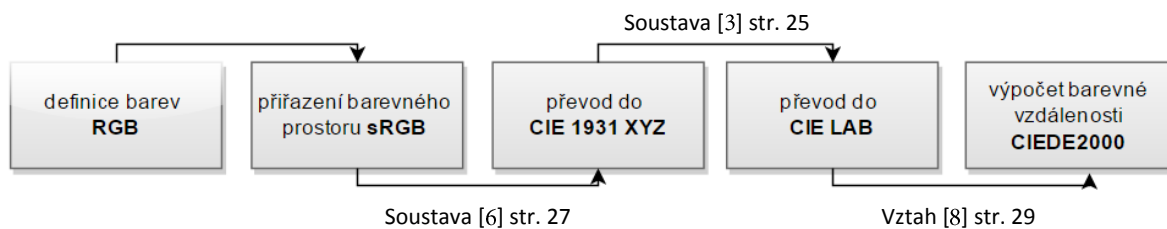


Obrázek 1. Podle toho, jak program zobrazí jednotlivé kvadranty lze určit, že podporuje ICC profily ve verzi 2 i 4 (vlevo), podporuje ICC profily pouze ve verzi 2 (uprostřed), nebo že ICC profily vůbec nepodporuje (vpravo)(Borg, 2003).

V poslední fázi řešení prvního dílčího cíle proběhla analýza sekvenčních barevných stupnic nástroje ColorBrewer 2.0 (Harrower a Brewer, 2003), z níž byly vyvozeny parametry, které se staly základem pro vlastní experimentální výzkum.

ColorBrewer 2.0 poskytuje specifikaci barev prostřednictvím souřadnic RGB. Tyto souřadnice byly vztaženy k absolutnímu barevnému prostoru sRGB, který představuje standard pro zobrazování barev v řadě moderních internetových prohlížečů. Souřadnice byly dále převedeny do referenčního prostoru CIE 1931 XYZ a CIELAB s použitím referenčního bílého bodu D65. Následně byla sousedícím intervalům stupnic vypočítána barevná vzdálenost metodou CIEDE2000 s nastavením koeficientů $K_l=K_h=K_c=1,0$ (obr. 2). Specifika a matematické vztahy mezi jmenovanými barevnými prostory jsou uvedeny v podkapitolách 3.3 a 3.4.

Vzhledem k nedostupnosti kvalitního spektrofotometru (zařízení umožňující přesné měření barev) byla barevná vzdálenost počítána pouze teoreticky, bez možnosti ověření reálných hodnot produkovaných na monitoru. v případě, že barevné výstupy mají přiřazený ICC profil sRGB IEC61966-2.1 a jsou zobrazeny na kalibrovaném monitoru v programu, který podporuje správu barev, lze předpokládat, že uvedené výpočty korespondují s realitou.



Obrázek 2. Schéma výpočtu barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0. Výpočetní vztahy jsou popsány v kapitolách 3.3 a 3.4.

2.2 DC2 Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti

Použité metody a postupy jsou u všech experimentů provedených v rámci druhého dílčího cíle obdobné, proto jsou jejich specifika shrnuta níže.

2.2.1 Experimentální stimuly

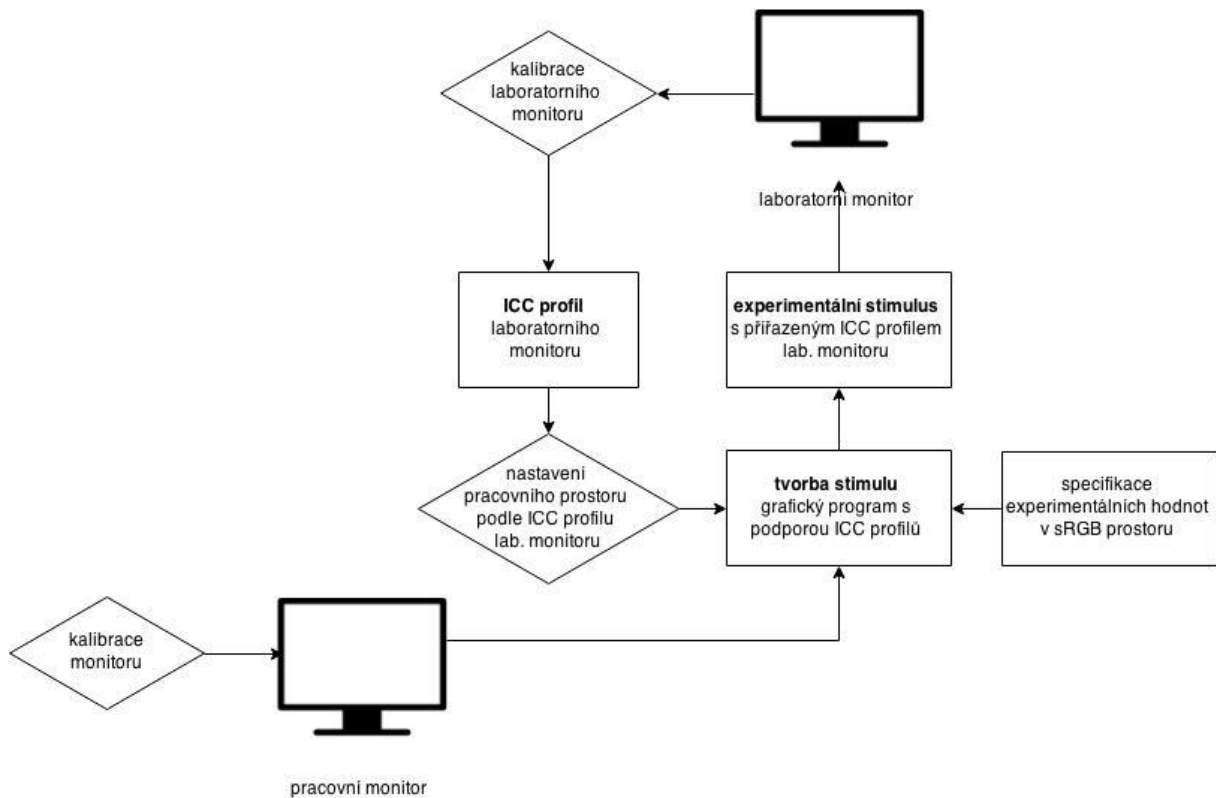
Všechny stimuly použité v experimentech byly statické mapy různých, především fiktivních, území, zjednodušené ve smyslu tematického obsahu a grafického provedení. Zjednodušení bylo nutné zavést z důvodu kontroly (resp. zamezení) vlivu nežádoucích nezávislých proměnných.

Sohledem na hlavní téma práce (výzkum vlivu barevné vzdálenosti), bylo nutné pečlivě kontrolovat způsob zobrazování stimulů. Z důvodu absence spektrofotometru, který by byl schopen změřit barvy emitované monitorem, byla barevná vzdálenost počítána pouze teoreticky vůči předpokládaným vlastnostem zobrazovacích zařízení.

Pro eye-tracking experimenty byl používán stále stejný monitor. Program pro spouštění experimentů (SMI Experiment Center) nepodporuje správu barev a barvy zobrazuje prostřednictvím celého gamutu monitoru. Proto byly stimuly převedeny z výchozího sRGB profilu do ICC profilu laboratorního monitoru, aby barevná vzdálenost na zobrazených stimulech odpovídala experimentálně stanoveným hodnotám. Schéma postupu tvorby stimulů s ohledem na zachování experimentálních hodnot barevné vzdálenosti je na obrázku 3.

Při webovém průzkumu nebylo možné barevnost stimulů vůbec kontrolovat. Stimuly měly přiřazený ICC profil sRGB. Vnímaná barevná vzdálenost záležela jak na samotných parametrech uživatelských monitorů, tak na webovém prohlížeči, který účastníci výzkumu pro experiment zvolili. Velké množství zapojených respondentů však zajistilo jistou míru ekologické validity¹ experimentu: v běžné praxi se tvůrci digitálních map nemohou spoléhat na vzhled jejich produktů na uživatelských monitorech, proto mohou výsledky webového dotazníku využít bez obav, že se nebudou schopni přiblížit ideálním laboratorním podmínkám.

¹ Ekologická validita je stupeň, ve kterém nástroj (test) predikuje chování v běžných, každodenních situacích, jde o formu externí validity (Preiss, 2005).



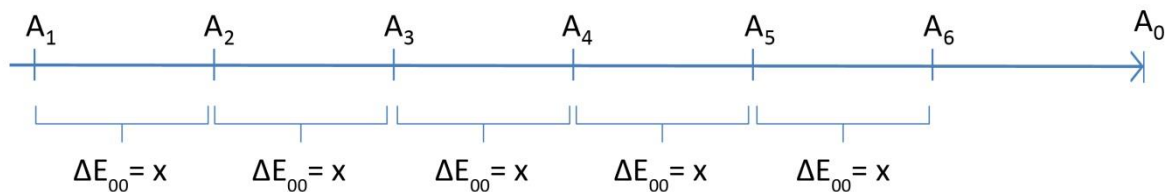
Obrázek 3. Postup přípravy experimentálních stimulů pro eye-tracking testování.

2.2.2 Barevnost stimulů

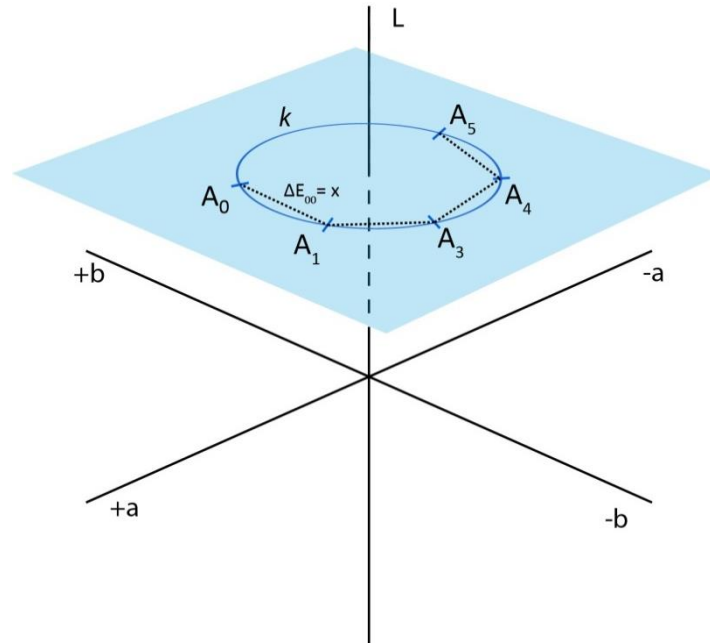
Pro výpočet barevné vzdálenosti ΔE_{00} byla použita metoda CIEDE2000, jejíž proměnné jsou definovány v prostoru CIELAB (výpočetní vztah [8] v podkapitole 3.4). Experimentální stimuly byly zobrazovány pouze v digitálním prostředí, a proto byla jejich barevnost omezena gamutem barevného prostoru sRGB.

Metoda konstrukce testovaných barevných schémat byla založena na výpočtech analytické geometrie, konkrétně průniku dvou podprostorů: barevného prostoru CIELAB a křivky, na níž leží hledaná barevná stupnice.

Princip konstrukce sekvenčních barevných stupnic spočíval v nalezení barev ležících na jedné přímce v daných vzdálenostech $\Delta E_{00} = x$ (obr. 4). Přímka je určena dvěma body A_1 a A_0 , kde A_1 se stává krajní hodnotou hledané stupnice a A_0 pomocnou barvou určující směr konstrukce stupnice v barevném prostoru CIELAB (Brychtová a Doležalová, 2014). Kvalitativní stupnice byly konstruovány obdobným způsobem na kružnici k ležící v rovině kolmé k ose L (obr. 5).



Obrázek 4. Princip konstrukce sekvenčních stupnic.



Obrázek 5. Princip konstrukce kvalitativních schémat.

Při přípravě experimentálních barevných schémat se objevily dva problémy:

Mezi barevnými prostory sRGB a CIELAB neexistuje vzájemně jednoznačné zobrazení a proto se mohlo stát, že definované vzdálenosti ΔE_{00} způsobily, že hledané barvy již neležely v prostoru sRGB.

Barevný prostor sRGB nemá po převodu do CIELAB konvexní tvar (Burger a Burge, 2013) a tudíž mohou existovat vnitřní body úsečky $|A_1A_0|$, které leží mimo prostor sRGB.

Pokud při konstrukci schémat nastal některý ze zmíněných problémů, pak souřadnice barvy, která ležela mimo prostor sRGB, byla posunuta do nejbližšího možného místa v rámci sRGB tak, aby její vzdálenost ΔE_{00} odpovídala požadované hodnotě.

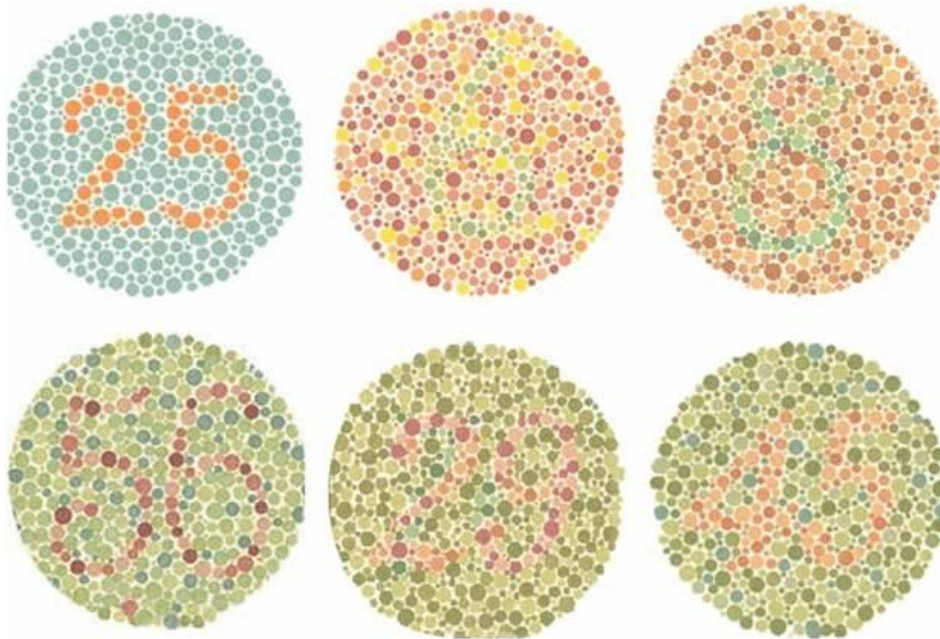
2.2.3 Průběh experimentů

V každé studii byli účastníci experimentu požádáni, aby uvedli svůj věk, pohlaví, zda jim byla lékařsky potvrzena porucha barvocitu a stupeň odbornosti v kartografii.

Věk byl zjišťován ve skupinách 16–19, 20–30, 31–40, 41–50, 51–60, 61–70 a 70 a více let.

Odbornost v kartografii byla zjišťována sebehodnocením na stupnici 1–5 a následovně klasifikována do dvou skupin: začátečník (při uvedení známky 1 nebo 2) a expert (při uvedení známky 3, 4 nebo 5).

Porucha barvocitu respondentů byla testována i prostřednictvím pseudoizochromatických tabulek (obr. 6). Pokud respondent uvedl, že je diagnostikován některou poruchou barvocitu, nebo neuspěl v testu barvocitu, jeho výsledky nebyly do vyhodnocení experimentu zahrnuty.



Obrázek 6. Pseudoisochromatické tabulky použité při testování barevného vidění respondentů (Waggoner, 2014).

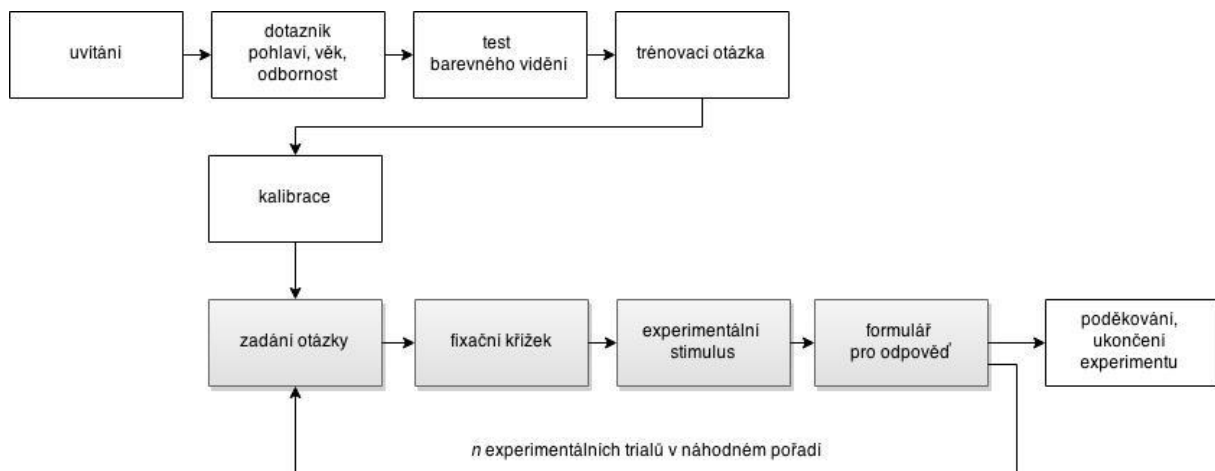
Při testování v eye-tracking laboratoři byla dále provedena třináctibodová kalibrace. Pokud přesnost kalibrace překročila hodnotu $0,7^\circ$, byla opakována. V některých případech nebylo možné respondenty úspěšně zkalibrovat. Pokud přesnost kalibrace opakovaně překročila stanovený práh, nebyly výsledky tohoto respondenta zahrnuty.

Na začátek experimentu byla zařazena tzv. *trenovací úloha*, při níž bylo účastníkům vysvětleno zadání, aby se zamezilo nepochopení otázky v průběhu měření dat. Následovaly sady stimulů vztahující se k experimentální úloze (tzv. *trial*). Každý trial obsahoval stimulus se zadáním otázky, fixační křížek a samotný experimentální stimulus. Účelem fixačního křížku bylo upoutat pohled do středu obrazovky, aby všechny hlavní stimuly byly prohlíženy ze stejného místa. Schematické znázornění průběhu celého experimentu je znázorněno na obrázku 7.

Pořadí trialů bylo pro každého účastníka jedinečné. Náhodné řazení úkolů se při experimentech běžně používá z důvodu zamezení (nebo rozptýlení) tzv. *efektu učení* (angl. *learning effect*). Efekt učení je považován za běžný, avšak nežádoucí zdroj zkreslení experimentálních výsledků. Je způsoben schopností účastníků naučit nebo přizpůsobit se experimentálním otázkám a potenciálně odpovídat správněji na otázky ke konci experimentu (Holmqvist et al., 2011). V případě, že je experiment dlouhý a nezábavný, autorka předpokládá opačný proces – tedy ke konci experimentu může upadat zájem respondenta řešit úlohu a jeho pozornost se snižuje. i v tomto případě je náhodné pořadí otázek vhodné.

Webový průzkum popisovaný v podkapitolách 5.2 a 5.3 byl vzhledem k velkému počtu experimentálních úloh pro respondenty časově náročný. Aby se předešlo poklesu pozornosti respondentů a případnému předčasnému ukončení dotazníku, za každým desátým stimulem byl zařazen vtip, nebo barevný klam s cílem udržet pozornost.

Ve všech studiích byli všichni respondenti vystaveni všem testovaným podmínkám (tzv. within-subject design, Rubin a Chisnell (2008)).



Obrázek 7. Průběh eye-tracking experimentu.

2.2.4 Sledované závislé proměnné a jejich interpretace

Ve všech provedených experimentech druhého dílčího cíle byly zkoumány dvě výkonnostní metriky - *účinnost* (správnost, nebo přesnost vyřešené úlohy) a *efektivita* (rychlost s jakou respondenti úlohu vyřešili).

K hlubšímu porozumění výsledků zjištěných tradičními výkonnostními metrikami byla provedena analýza vybraných eye-tracking metrik (frekvence fixací, průměrná délka fixací a rychlost scanpath) a analýza přesunů mezi definovanými oblastmi zájmu (AOI). Analýza eye-tracking dat může naznačit míru kognitivní zátěže nebo strategii respondentů v průběhu řešení úkolu (Holmqvist et al., 2011). Studie, které potvrzují existenci vazby mezi eye-tracking metrikami a kognitivní zátěží existují i v kartografii (např. Çoltekin et al., 2009, 2014; Fabrikant et al., 2010; Kiefer et al., 2013; Ooms et al., 2012; Opach, 2010; Popelka a Brychtová, 2013; Schnürer et al., 2014)

Význam eye-tracking metrik lze pro hodnocení efektivity vizuálního vyhledávání interpretovat následovně: Více fixací [$\text{počet fixací} \cdot \text{s}^{-1}$] indikuje nižší efektivitu vyhledávání (Goldberg a Kotval 1999). Delší doba trvání fixací [ms] může znamenat zvýšenou obtížnost při odvození významu informace, nebo také, že fixovaný objekt je v určitém smyslu více zajímavý nebo relevantní pro řešení úkolu (Poole a Ball, 2005; Eastman, 1985). Rychlost scanpath popisuje počet pixelů, které pohled urazí za jednotku času [$\text{px} \cdot \text{s}^{-1}$]. Nižší rychlost scanpath lze interpretovat jako určitou míru (sebe)jistoty a rozvážnosti při hledání cíle (Brychtová, Coltekin 2014).

Přesuny jsou definovány jako pohyby z jedné AOI do druhé (Holmqvist et al., 2011). Interpretace přesunů závisí na konkrétním problému a definovaných AOI.

Detekce fixací byla provedena použitím algoritmu ID-T (v angl. *dispersion threshold algorithm*). Prahová hodnota rozptylu (v angl. *dispersion threshold*) byla nastavena na 50 px a minimální délka fixace na 80 ms. Pravidla pro nastavení prahových hodnot detekčního algoritmu v současnosti

neexistují; hodnoty se tedy liší v závislosti na autorském úsudku a často v odborných pracích chybí argumentace pro zvolená nastavení. Prahové hodnoty, které byly pro identifikaci fixací použity ve všech experimentech této disertační práce, byly převzaty od Popelky (2014), který jejich velikost stanovil s ohledem na vhodnost pro analýzu pohybu očí při řešení prostorové úlohy s mapou.

Obdobně problematické je definování *oblastí zájmů* (v angl. *Areas of Interest*, AOI). V práci byly AOI využity při analýze přesunů. Konstrukce AOI, jejich umístění a tvar, musí vycházet z testované hypotézy, kompozice stimulu, kvality záznamu eye-tracking dat a metod použitých pro jejich analýzu (Holmqvist et al., 2011). Podle Sippela et al. (2015) existují dva přístupy tvorby AOI: ručně definované a definované na základě dat. Holmqvist et al. (2011) druhý typ dělí dále na automaticky generované podle stimulu, definované podle tzv. attention map a definované shlukováním naměřených dat.

Výhoda definování AOI na základě naměřených dat spočívá v možnosti odhalit specifické vzorce chování respondentů při řešení úloh a možnosti přizpůsobit tvar, velikost i umístění AOI na základě přesnosti dat. Druhá zmíněná výhoda se ale může stát i nevýhodou, pokud umístění AOI na základě nepřesně naměřených dat ztratí vazbu na relevantní část stimulu.

Vzhledem k jednoduchosti stimulů a zadání experimentálních úkolů bylo chování respondentů dobře předpověditelné, a proto byla zvolena první varianta, tedy ruční specifikace AOI bez ohledu na naměřená data. i tato metoda má svá úskalí. AOI nesmí být příliš malá, aby pokryla všechny patřičné záznamy i přes případné nepřesnosti záznamu. Zároveň nesmí být moc velká, aby nepokrývala fixace, které nejsou relevantní. Optimální velikost AOI ale není definovaná a tak záleží na rozhodnutí konkrétního odborníka a vhodné interpretaci získaných poznatků.

Způsob konstrukce AOI je uveden v rámci konkrétních studií práce.

2.2.5 Použitý HW a SW

Pro dotazníkové šetření byl využit open source nástroj Lime Survey ve verzi 1.9 (The LimeSurvey project, 2011). Ten umožňuje měřit čas potřebný k vyřešení otázky s přesností na milisekundy, nastavit náhodné pořadí zobrazování stimulů pro každého účastníka a další parametry, které jsou běžně aplikovány při studiích použitelnosti. Naměřená data jsou ukládána do databáze MySQL.

Pilotní testování experimentů popsaných v podkapitolách 5.2 a 5.3 proběhlo v eye-tracking laboratoři GIScience Center, Department of Geography, University of Zurich na zařízení Tobii X120 o vzorkovací frekvenci 60 Hz s využitím programového vybavení Tobii Studio 3.2.2 od stejného výrobce.

Ostatní eye-tracking experimenty proběhly v kontrolovaných laboratorních podmínkách v laboratoři Katedry geoinformatiky PŘF UPOL, která je vybavena bezkontaktním nízkofrekvenčním eye-trackerem SMI RED 250 se vzorkovací frekvencí 120 Hz.

Pro promítání stimulů byl použit 23" monitor LG Flatron IPS231P. Monitor byl kalibrován sondou ColorMunki PHOTO a zároveň získán jeho ICC profil, který byl použit při přípravě stimulů pro eye-tracking experiment.

Experimenty byly připraveny v prostředí SMI Experiment Center (SensoMotoric Instruments 2013a). Ve všech eye-tracking experimentech byly použity statické stimuly vytvořené v programu Adobe Illustrator CS6 s vloženým ICC profilem laboratorního monitoru s rozlišením 1920×1200 px.

Zpracování naměřených dat proběhlo v programech SMI BeGaze (SensoMotoric Instruments, 2013b) a OGAMA (Voßkübler 2013). Statistická analýza naměřených dat a vizualizace výsledků proběhla především v programu R (R Core Team 2013).

2.2.6 Použité statistické testy a jejich interpretace

Pro ověření stanovaných hypotéz byly provedeny následující statistické testy: Shapiro-Wilkův test normality, Pearsonův Chí-kvadrát test dobré shody, Mann-Whitneyův test, Kruskal-Wallisův test a post-hoc Kruskal-Wallisův test.

Shapiro-Wilkův test normality testuje, zda je populace rozdělena normálně. Pokud je výsledkem testu hodnota p menší než zvolená hladina významnosti α , zamítá se H_0 ve prospěch H_A a nelze říct, že testovaná data jsou normálně rozdělena. Ve všech případových studiích, které jsou uvedeny dále, bylo rozložení dat nenormální, a proto byly dále používány pouze neparametrické testy.

Pearsonův Chí-kvadrát (χ^2) test dobré shody umožňuje na kategoriálních datech ověřit nulovou hypotézu, že zjištěné rozložení se shoduje s očekávaným. Byl použit pro srovnání míry správnosti odpovědí respondentů.

Mann-Whitneyův u test (také nazýván jako Wilcoxon rank-sum test) je používán k ověření nulové hypotézy, že dvě populace mají stejné distribuční funkce a tedy stejné mediány, oproti alternativní hypotéze, že tyto dvě distribuční funkce se liší v průměrném pořadí hodnot (Mann a Whitney, 1947). Tento test je neparametrickou alternativou t-testu. Test byl používán k porovnání času do odpovědi a eye-tracking metrik naměřených pro zkoumané nezávislé proměnné.

Kruskal-Wallisův H test je rozšířením Mann-Whitneyova testu pro porovnání více než dvou populací. Je alternativou pro jednofaktorovou analýzu rozptylu (ANOVA). Testuje nulovou hypotézu, že všechny populace mají stejnou distribuční funkci oproti alternativní hypotéze, že alespoň dvě populace ze vzorku se liší v průměrném pořadí hodnot (Kruskal a Wallis, 1952). Nulová hypotéza předpokládá, že měření ve skupinách mají stejné hodnoty. *Post-hoc Kruskal Wallisův test* je používán pro párové porovnání testovaných populací. Testy byly použity k porovnání času do odpovědi a eye-tracking metrik naměřených pro zkoumané nezávislé proměnné.

Hypotézy byly testovány na hladině významnosti $\alpha=0,05$ a $\alpha=0,01$. V grafech jsou signifikantní výsledky na hladině významnosti $\alpha=0,05$ značeny jednou hvězdičkou (*) a $\alpha=0,01$ dvěma hvězdičkami (**).

2.3 DC3 Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic

Analýzou výsledků z druhého dílčího cíle byly získány poznatky o optimálním nastavení hodnot barevné vzdálenosti v rámci barevné škály. Tyto závěry byly okomentovány a prezentovány jako sada doporučení pro kartografickou vizualizaci. Zároveň byl vytvořen nástroj, který na základě parametrů zadaných uživatelem (počáteční a koncová barva škály, počet kategorií a barevná vzdálenost) dokáže specifikovat ostatní stupně barevné škály.

Uživatelské rozhraní vytvořeného nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0* bylo vytvořeno s využitím HTML, CSS, PHP a JavaScript. Pro výběr barev byl implementován dialog vytvořený Dyerem (2007), který umožňuje specifikaci barev v souřadnicích HSB, RGB a HEX, nebo výběrem z palety. Nástroj je dostupný z adresy <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

3 TEORIE BAREVNÉ VZDÁLENOSTI (SOUČASNÝ STAV)

Používání jednotné terminologie v jakékoli oblasti výzkumu je klíčem k porozumění mezi badateli a k rozvoji dané disciplíny. Ačkoli je výzkum barev a jejich percepce v zájmu řady vědců již od konce 18. století, stále se terminologie neustálila a proto je porozumění i těch nejzákladnějších (a tedy nejdůležitějších principů) často obtížné (Fairchild, 2005). Tato kapitola si klade za cíl dát do souvislosti klíčové pojmy a informace, které jsou pro disertační práci stěžejní.

3.1 Hodnocení čitelnosti map

Primární funkcí map a jiných forem vizualizace prostorových jevů (dynamických, interaktivních, personalizovaných digitálních map, 3D modelů zástavby, či krajiny, atd.) je graficky reprezentovat jevy vyskytující se v reálném světě, včetně jejich vlastností a prostorových vztahů (Robinson et al., 1995). Po staletí byly mapy tvořeny a využívány jako abstrakce reálného světa se schopností předat svému uživateli ucelený obraz o složitém prostředí, které ho obklopuje (Fairbairn, 2006). Od mapy se očekává schopnost podávat informace, jež jsou kritické pro účely navigace, plánování a jiné prostorové úkoly (Brodersen et al. 2001). Jako nástroj komunikace a informačního přenosu jsou mapy v neustálém zájmu kartografů, kteří zkoumají a hodnotí její informační obsah a použitelnost výsledné podoby vizualizace.

Společným zastřešujícím cílem v kartografickém výzkumu hodnocení metod kartografické vizualizace, je stanovení pravidel, které mohou být použity k vytvoření ‚dobré mapy‘ a dokáží ji odlišit od ‚špatné mapy‘ (pojmem ‚mapa‘ je při tom vyjádřeno celé spektrum vizualizací prostorových jevů).

Kvalita mapy záleží na řadě faktorů a vzhled mapy by měl být - pokud možno - empiricky podložen; mapa musí být vhodná zamýšlenému účelu a ideálně ‚šitá na míru‘ svému uživateli (Kaňok 1999). ‚Dobrá mapa‘ bude pro uživatele různého vzdělání, věku, profesní orientace a dovedností pokaždé něčím jiným (Olson, 1979).

Za účelem zjistit subjektivní odlišnosti mezi uživateli map, anebo vhodnost mapy pro určitý typ úlohy se provádějí tzv. *studie použitelnosti* (v angl. *usability studies*).

Pojem *použitelnost* (v angl. *usability*) je definován standardem ISO 9241-11: Guidance on Usability (ISO 9241-11, 1998) jako efektivita, účinnost a uspokojení, se kterou uživatelé v určitém prostředí dosáhnou požadovaného cíle.

Při těchto studiích se běžně sledují dvě tzv. *metriky výkonnosti* (v angl. *performance metrics*), které vycházejí ze samotné definice: *efektivita* (v angl. *efficiency*), tedy rychlost s jakou dokáže uživatel zjistit požadovanou informaci z mapy (resp. rychlost s jakou mapa dokáže informaci uživateli předat), a *účinnost* (v angl. *effectiveness*), tedy správnost/přesnost zjištěné informace.

Vedle uvedených výkonnostních metrik (efektivita a účinnost) je často sledována i *míra uspokojení* (v angl. *satisfaction*) uživatele s mapou. Míru uspokojení může reflektovat atraktivita mapy, která je dána preferencí či sympatiemi uživatele jejího uživatele (Çöltekin et al., 2009).²

Efektivita a účinnost může pozitivně korelovat s mírou uspokojení; při práci se dvěma porovnatelnými mapami (stejného účelu, ale odlišného vzhledu) budou uživatelé patrně preferovat mapu, která dokáže předat informace rychleji, či přesněji (Schnürer et al. 2014). Existují ale i případy, kdy se na preferované podobě mapy neprojeví vyšší efektivita, ani účinnost (Haklay a Zafiri, 2008; Hegarty et al., 2009).

Mezi metody hodnocení použitelnosti patří mimo jiné technologie eye-tracking, která umožňuje zaznamenat proces prohlížení vizuálního vjemu formou ukládání souřadnic místa pohledu v určité frekvenci. Metodou eye-tracking je možné zjistit míru efektivitu obrazové předlohy a odhalit strategii a určité vzorce uživatele při získávání odpovědi na otázku (Salvucci a Goldberg 2000). Po klasifikaci naměřených dat ve smyslu identifikace základních pohybů očí (fixací a sákad) lze odvodit tzv. eye-tracking metriky (například počet, délka trvání, či disperze fixací, délka a průběh zaznamenané trajektorie pohledu). Jejich vyhodnocením lze zjistit vztah respondenta vůči sledovanému obrazu (Brychtová a Popelka 2012). Například je známo, že fixace dlouhého trvání poukazují na nedostatek relevantních objektů, nebo na skutečnost, že se oko setkalo s obtížnou informací, jejíž dešifrování vyžaduje delší čas (Goldberg a Kotval, 1999). Počet fixací indikuje úsilí ve vyhledávání relevantních objektů, přičemž vysoký počet fixací znamená, že uživatel musí identifikovat mnoho objektů, než najde požadovaný cíl (Poole a Ball 2005).

Eye-tracking pro výzkum kognice map využili například Ooms et al. 2012, Brychtová et al. 2012, Opach 2010, Çöltekin et al. 2010, Li et al. 2010 a další.

Zajímavou metodou pro sledování reakcí uživatele je měření odporu kůže (SCR, v angl. *skin conductance response*). První z pokusů uplatnit tuto metodu v kartografii učinila Fabrikant et al. (2012) pro sledování emocí uživatelů map při práci s mapami. Její studie s čitelností map souvisí jen částečně, přesto lze očekávat, že v budoucnosti bude SCR využíváno ve větší míře.

V kartografii platí, že aby byla mapa použitelná, musí umožnit snadné ‚přečtení‘ zobrazené informace (Harrie a Stigmar, 2010). Lze tedy říct, že mezi *použitelností* mapy, ve výše uvedeném smyslu, a *čitelností* panuje rovnost.

Zřejmě díky jednoznačnosti významu nebyla *čitelnost mapy* v kartografii doposud definována. Běžně se pojmem *čitelnost* rozumí stav jednoduchého vyřešení čtecí úlohy (Bartz 1970). V anglické terminologii se vyskytují dva pojmy, které lze do češtiny přeložit shodně jako *čitelnost*, ale jejich význam je odlišný – jedná se o *legibility a readability*. První z pojmů se dá volně přeložit, jako

² Česká terminologie se v případě *usability studies* ještě neustálila. Anglické pojmy vychází především ze standardu ISO 9241-11 (ISO, 1998). Štěrba (2012) ve své disertační práci termíny *efficiency a effectiveness* spojuje do jediného pojmu *efektivita* a tu definuje jako parametr, který určuje, jak rychle a jednoduše se uživatel dostane k požadované informaci; přičemž ji lze kvantifikovat jako chybovost a čas potřebný k vykonání operace. Podle autorčina názoru je z důvodů odlišných postupů analýzy obou metrik nezbytné pojmy rozlišovat.

schopnost za daných podmínek *přečíst* informaci, zatímco druhý z nich popisuje schopnost čtenáře *porozumět* přečtené informaci (Bartz 1970). Oba pojmy se mohou uplatnit i v souvislosti s mapami. Je totiž rozdíl, zda uživatel dokáže vnímat a rozlišit dva kartografické znaky na základě jejich vzhledu (legibility) a zda také dokáže tyto dva znaky interpretovat z hlediska významu (readability). Druhý případ nemůže nastat, pokud není zajištěna čitelnost prvního druhu.

Studie, které se zabývají vyhodnocením čitelnosti map (ať už prvního, nebo druhého druhu), sledují především dobu, za kterou účastníci experimentu vyřešili zadaný úkol (efektivita) a správnost odpovědi (účinnost). Často se také zaznamenává sebehodnocení, při kterém respondent uvádí míru své jistoty při odpovídání na otázky, jak obtížné se mu jevílo zadání a zda se mu předložené stimuly zdály být estetické, přehledné atd. (míra uspokojení; například MacEachren et al. 1998, Gilmartin a Shelton 1989).

Podle Harrie a Stigmar (2010) existují dva druhy omezení čitelnosti map. První druh omezení čitelnosti představuje „složitost mapy“ ve smyslu množství a distribuce zobrazených informací. Harrie a Stigmar publikují několik metod měření složitosti mapy, které jsou založeny na výpočtu množství zobrazených objektů na mapě, množství zlomových bodů vizualizovaných objektů, délce liniových objektů a ploše zobrazených prvků. Měřením složitosti a informačním obsahem map se v podobném duchu zabývala řada dalších autorů (například Bjorke a Saeheim 2007, Battersby a Clarke 2003, Li a Huang 2002, Bjorke 1996, Neumann 1994, Tobler 1994, Sukhov 1970). Ve všech případech se jedná o aplikace Shannonovi teorie informace (Shannon 1948) a výpočet celkové entropie mapy.

Druhá skupina omezení se týká metod kartografického vyjadřování a provedení kartografických znaků. Touto problematikou se Harrie a Stigmar příliš nezabývali a problematiku shrnuli tvrzením, že každý objekt zobrazený na mapě musí být dostatečně velký, aby byl čitelný normálním uživatelem. Existuje ale celá řada odborných prací, které se čitelností mapy v souvislosti s kartografickým vyjadřováním zabývají. Bjorke (1996) uvádí základní pravidlo stanovující nutnost zabezpečit dostatečnou vizuální vzdálenost mezi mapovými znaky, aby je bylo možné mezi sebou rozlišit. Vzdálenost mezi dvěma znaky může být měřena různými způsoby v závislosti na konkrétních potřebách a na metrickém prostoru.

3.2 Zařazení barevné vzdálenosti do konceptu vizuální vzdálenosti

Barva je velice dominantním vizuálním stimulem, a proto je i důležitým elementem vzhledu map. Používání barev na mapách je většinou řízeno kartografickými konvencemi a pravidly, které jsou založeny na staletích praxe (Slocum et al., 2008).

V kartografii barva patří mezi *vizuální proměnné*, jejichž koncept představil J. Bertin (Bertin, 1983). Každá změna parametru vizuální proměnné mapového znaku znamená změnu jevu, který znak představuje. Parametry vizuálních proměnných kartografických znaků ovlivňují schopnost uživatele zaznamenat rozdíl mezi mapovanými jevy, nebo je na mapě vyhledat (Deeb et al., 2014; Garlandini a Fabrikant, 2009).

Rozdílnost parametrů vizuálních proměnných lze kvantifikovat prostřednictvím *vizuální vzdálenosti*. Tento pojem je v kartografickém výzkumu používán, ale doposud nebyl definován. Proto autorka uvádí vlastní definici pojmu *vizuální vzdálenost*, kterou vytvořila syntézou užívaných významů v odborné literatuře (Bjorke, 1996; Eastman a Bertin, 1986; Harrie a Stigmar, 2010; Steinrücken a Plümer, 2013):

Vizuální vzdálenost mapových znaků je přesně stanovená číselná hodnota popisující míru variace vizuálních proměnných, které definují parametry znaků.

V kartografii je důležité zabezpečit dostatečnou vizuální vzdálenost mezi kartografickými znaky, aby bylo umožněno jejich snadné rozlišení a interpretace (Bjorke, 1996). Vizuální vzdálenost je možné separátně hodnotit pro všechny retinální (velikost, orientace, textura, tvar, barevný tón, jas barvy) i planární vizuální proměnné (souřadnice umístění). Řada vědeckých prací se zabývala sledováním reakcí uživatelů map na změnu vizuálních proměnných s cílem stanovit optimální vizuální vzdálenost mezi znaky.

Vizuální vzdálenost bodových znaků ve vztahu k jejich **velikosti** podle intervalové stupnice zkoumali například Meihoefer (1969) a Dent et al. (2009). Jejich experimentálním výsledkem byla sada dobře rozlišitelných kruhových znaků.

Vliv **orientace** znaků na animovaných mapách testoval Cybulski (2014). Vliv změny **textury** ani **tvaru** znaků na jejich vnímání nebyl v kartografii doposud patrně studován. Metriky pro stanovení vizuální vzdáleností těchto proměnných ale existují. Ve velkém zájmu vědců je stanovení výpočtu podobnosti na základě tvaru (Belongie et al., 2002; Gadi et al., 1999; Latecki a Lakamper, 2000; Pászto et al., 2015; Veltkamp, 2006).

Výzkumem spojeným s **barvami** (tónem i jasem) a jejich vzájemné odlišitelnosti se zabývala řada kartografů. Gilmartin a Shelton (1989) testovali, jaký počet kategorií kartogramu a jaké barevné schéma je optimální z hlediska schopnosti efektivně odlišit vizualizovanou informaci. Výsledky potvrdily, že kartodiagram s nižším počtem kategorií je pro interpretaci jednodušší. Zároveň zjistili, že správnou interpretaci ovlivňuje i zvolené barevné schéma – barevná stupnice v odstínech šedi byla vhodnější než v odstínech zelené a fialové. K tématu disertační práce je blízký výzkum americké kartografky C. Brewer (Brewer et al. 2003, Brewer 1986, 1992, 1994, 1996, 1997, 1999, Harrower a Brewer 2003), která dlouhodobě vyvíjela sadu barevných stupnic pro vizualizaci kvalitativních i kvantitativních dat. Barvy definovala s ohledem na zachování jednotně vnímaných barevných odstupů mezi sousedícími kategoriemi s využitím Munsellova barevného modelu. Zároveň se zabývala optimalizací barevných stupnic pro osoby s poruchou barevného vidění. Tuto tematiku zahrnuli do své práce i Jenny a Kelso (2007a, 2007b), kteří vyvinuli simulátor umožňující zobrazit mapy v barvách blízkých percepci uživatelů trpících deuteranopií, protanopií a tritanopií. Jejich práci využívali Kröger et al. (2013), kteří se zabývali optimalizací stávající barevné stupnice pro komunikace v OpenStreetMap pro uživatele s poruchou barvocitu.

Aplikací principu zachování stejné vizuální vzdálenosti pro data stejné kvalitativní či kvantitativní odlišnosti se zabývali Steinrücken a Plümer (2013). Jejich výzkum byl zaměřen na definování

globálních pravidel tvorby barevných stupnic, která jsou aplikována pro webové mapové služby, které umožňují svým uživatelům přizpůsobit si vizualizaci dat podle svých požadavků. Tvorbou optimálních barevných stupnic pro hlukové mapy se věnuje Weninger (2013), která se snaží postihnout asociativnost mezi tónem a jasem barvy a vnímaným hlukem. Chesneau (2007), Kunz a Hurni (2011) řešili problematiku nedostatečné vizuální vzdálenosti na mapách zobrazujících přírodní rizika. Přestože je výzkum vnímání barev na mapách v porovnání s ostatními vizuálními proměnnými podpořen patrně největším množstvím odborných studií, žádná z nich se přímo nevěnuje stanovení optimální vizuální vzdálenosti ve vztahu k odstínu a jasů barvy.

Pro vizuální vzdálenost mezi barvami se používá termín *barevná vzdálenost* (z angl. *color distance*, nebo *color difference*). Základními specifiky této metriky, která je hlavním tématem disertační práce, se věnuje podkapitola 3.4.

3.3 Barevné modely a prostory

Mechanismus vnímání barev člověkem byl poprvé správně vysvětlen na začátku 19. století Thomasem Youngem. Barevný vjem je vytvořen na základě reakce dopadajícího světla s různými typy světločivých buněk (fotoreceptorů, konkrétně čípků) na sítnici oka (Gegenfurtner a Sharpe 2001). Každý typ čípků má svou maximální citlivost v různých oblastech spektra, které velice přibližně odpovídají oblasti červeného, zeleného a modrého světla (Ohta a Roberson 2005) a výsledný barevný vjem je vytvořen kombinací tří počítků. Vidění realizované třemi jmenovanými druhy čípků se označuje jako *trichromatické*. Objasnění principu vnímání barev podnítilo vznik *trichromatické teorie*, která předpokládá, že téměř všechny barvy mohou být vytvořeny smícháním tří monochromatických světél, většinou červeného, modrého a zeleného (Ohta a Roberson 2005).

V současnosti je barevný výzkum rozdělen do dvou směrů: *psychofyzikálního* a *percepčního*. Oba směry jsou určeny již základní definicí pojmu *barva*. Z psychofyzikálního hlediska je barva definovaná jako *specifikace stimulu prostřednictvím funkčně definovaných hodnot* (CIE, 2014a), například zmíněných trichromatických hodnot, nebo spektrálního měření (Brainard, 2003). Z percepčního hlediska zní definice barvy jako *charakteristika vizuálního vjemu, který lze popsat pomocí atributů tón, sytost a jas* (CIE, 2012a).

3.3.1 Způsoby specifikace barev

Mechanismus, kterým lze popsat vznik barevného stimulu, je označován jako *model specifikace barev*³, který se skládá ze tří nebo čtyř složek reprezentujících organizaci barev (Levkowitz, 1997).

Různí autoři uvádějí různá dělení systémů specifikace barev (Brainard, 2003; Levkowitz, 1997; Ohta a Robertson, 2005; Robinson et al., 1995). Dle autorky nejlepší dělení systémů specifikace barev

³ Terminologie této problematiky není ustálená. Pro stejnou záležitost různí autoři používají různé pojmy: *color specification systems* (Levkowitz, 1997; Ohta and Robertson, 2005), *color modeling systems* (Robinson et al., 1995)), v české kartografické literatuře se objevuje pouze pojem *barevný model* (Kaňok, 1999; Voženílek, 2004).

uvádí Levkowitz (1997). Jeho dělení je v této podkapitole uvedeno, avšak se záměnou pojmu ‚systém‘ za ‚model‘, protože se autorka domnívá, že pojem ‚model‘ je v kartografických publikacích vžitější:

a) instrumentální modely (závislé na zařízení)

Tyto modely jsou určeny pro specifikaci barevného gamutu (rozsahu barevnosti) konkrétních přístrojů (např. monitorů a tiskáren) a dále se dělí na aditivní (např. RGB) a subtraktivní (např. CMY/K) systémy.

b) pseudo-percepční modely

Modely využívají pro definování barev terminologii, která označuje proměnné způsobem blízkým lidskému vnímání. Umožňují změnu nastavení v osách, které odpovídají *tónu* barvy, *sytnosti* a *jasu*. Patří k nim například barevné modely HLS, HSV, HSB.

c) kolorimetrické modely

Matematické funkce mezi proměnnými kolorimetrických modelů jsou definovány na základě experimentů, při kterých se porovnávala shodnost barevného vjemu složeného trichromatického světla s monochromatickým. Jsou založeny na principu lidského vnímání barev. Barevný stimulus je vytvořen přesně definovanou kombinací několika barevných složek. Příkladem je model CIE 1931 XYZ.

d) percepčně jednotné modely

Tyto modely umožňují porovnávání barev, které odpovídá lidské percepci. Vzdálenost barev popsaná v percepčně jednotných modelech odpovídá vnímanému rozdílu barev. Příkladem je Munsellův systém barev nebo modely CIELAB a CIELUV.

3.3.2 Specifika vybraných barevných modelů a prostorů

Sada barev, která vznikne kombinací komponent barevného modelu, se označuje jako *barevný prostor* (taktéž označováno jako *barevný gamut*). Barevné prostory se dělí na relativní a absolutní (WorkWithColor.com, 2013):

Relativní barevný prostor je definovaný pouze prostřednictvím komponent barevného modelu. V rámci relativního prostoru lze hodnotit pouze vztahy mezi barvami právě v daném prostoru bez možnosti určení jejich absolutního vzhledu.

Absolutní barevný prostor musí být definován vůči určitému *referenčnímu barevnému prostoru*, který představuje standardizovaný popis lidského vjemu barev za určitého osvětlení. Mezi nejčastěji používané referenční barevné prostory patří CIE 1931 XYZ nebo CIELAB. Kromě toho je nezbytné specifikovat podmínky osvětlení prostřednictvím teploty referenčního bílého světla - například denní světlo D65 o barevné teplotě 6500 K (Pascale, 2003) Absolutním barevným prostorem lze popsat konkrétní a nezaměnitelnou podobu barvy.

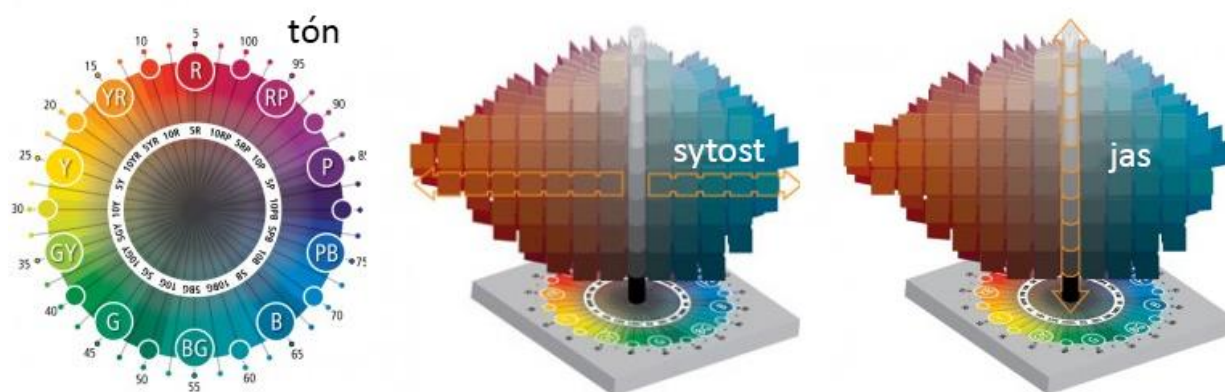
Příkladem absolutních barevných prostorů mohou být v digitální grafice často využívané sRGB, Adobe RGB, či ProPhoto RGB barevné prostory, jejichž tři základní komponenty (R, G a B) jsou definovány souřadnicemi barevného prostoru CIE 1931 XYZ a referenčním bílým světlem D65. Bez udání referenčních hodnot by barva definovaná pouhými souřadnicemi RGB mohla nabývat prakticky jakékoli podoby.

3.3.3 Specifikace barev odpovídající lidskému vnímání

Pro disertační výzkum jsou stěžejní barevné prostory odvozené z percepčně jednotných modelů, kterými lze kvantifikovat rozdílnost barev odpovídající lidskému vnímání. Podle mezinárodní komise pro osvětlení (CIE, 2012) je percepčně jednotný takový model, v němž určitá vzdálenost odpovídá vnímané vzdálenosti stejné velikosti. Určitá změna barvy v percepčně jednotném barevném prostoru vyvolá rovnocenně vnímanou změnu (Slocum et al., 2008).

O první úspěšný, ne však dokonalý, pokus definovat percepčně jednotný prostor se zasadil Albert Munsell, americký malíř a učitel umění (Landa a Fairchild 2005). Barvy *Munsellova systému barev* jsou popsány hodnotou vyjadřující *tón*, *sytnost* a *jas* (obr. 8). Na základě vlastního měření dokázal Munsell ve svém modelu odrazit fakt, že lidské oko je v různých oblastech barevného spektra různě citlivé. Pro každou úroveň tónu a jasu tedy existuje různé množství stupňů sytnosti, tak aby výsledek odpovídal skutečnému vjemu, což způsobuje nepravidelnost tvaru modelu - například nejsvětlejší možný odstín zelené se jeví světlejší než nejsvětlejší možný odstín červené (X-Rite, 2012).

Munsellův barevný model je po úpravách a zpřesnění používán i v současnosti. V kartografii ho využívala především Brewer (1996) a Chesneau (2007).



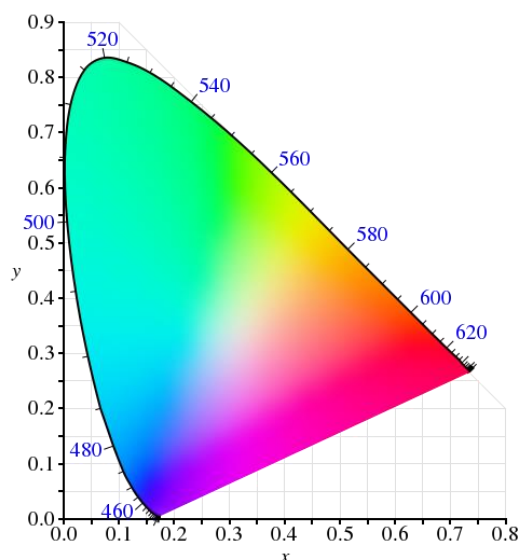
Obrázek 8. Munsellův barevný prostor: barvy jsou uspořádány v třídímním prostoru, který je definován komponentami *tón*, *sytnost* a *jas* (upraveno podle X-Rite, 2012).

Prvním matematicky definovaným barevným modelem a zároveň prostorem je *CIE 1931 XYZ*, který vytvořila International Commission on Illumination. Model definuje kvalitativní vztah mezi fyzikálně čistými barvami (vlnovými délkami) v elektromagnetickém viditelném spektru a fyziologicky vnímanými barvami průměrným lidským okem. Model byl definován na základě rozsáhlého experimentálního měření, při němž pozorovatel posuzoval, kdy nastane shoda (tzv. metamerismus) mezi monochromatickou barvou definovanou v rozsahu vlnových délek 380 nm až 780 nm a barvou složenou ze tří monochromatických složek (červené $\lambda_r = 700$ nm, zelené $\lambda_g = 546,1$ nm a modré $\lambda_b = 435,8$ nm), jejichž intenzitu světla účastníci experimentu nastavovali (Fairchild 2013).

Model je tvořen třemi komponentami: komponenta Y odpovídá jasu barvy, zatímco X a Z jsou odvozeny z chromatických souřadnic x , y (obr. 8) a Y vztahy [1] a [2]:

$$X = \frac{Y}{y}x \quad [1]$$

$$Z = \frac{Y}{y}(1 - x - y) \quad [2]$$

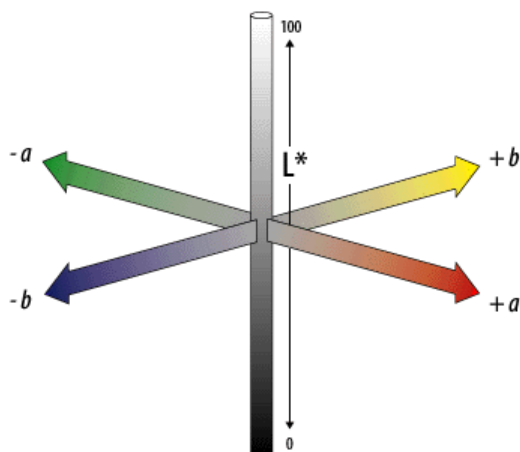


Obrázek 9. Chromatický diagram barevného prostoru CIE 1931 XYZ. Ze souřadnic x , y a jasu barvy Y se odvozuji souřadnice X , Z . Vnější zakřivená hranice představuje monochromatické barvy a jejich vlnové délky (nm). Barvy tohoto diagramu by měly být maximálně syté, ale jejich vzhled je ovlivněn možnostmi prohlížečného zařízení, nebo tiskárny, která tuto stránku vytiskla. (<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931.png>)

Barevný model CIE 1931 XYZ, který sám o sobě nesplňuje podmínky percepční jednoty, se stal základem pro odvozování dalších modelů, například téměř percepčně lineárních CIELAB (označován také jako CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)) nebo CIELUV (též CIE 1976 ($L^*u^*v^*$)) (Landa a Fairchild 2005).

Barevný model CIELAB popisuje všechny člověkem vnímatelné barvy a je tedy nezávislý na zařízeních. Souřadnice CIELAB jsou nelineárními funkcemi souřadnic CIE 1931 XYZ, které jsou závislé na specifikaci bílého bodu (CIE, 2014b).

Model CIELAB je tvořen třemi komponentami (obr. 10): L reprezentuje jas barvy ($L = 0$ představuje černou; $L = 100$ představuje rozptýlenou bílou), a reprezentuje osu mezi červenou a zelenou (při $a > 0$ se barvy přibližují červené, při $a < 0$ se barvy přibližují zelené), b reprezentuje osu mezi modrou a žlutou (při $b > 0$ se barvy přibližují modré, při $b < 0$ se barvy přibližují žluté). Komponenty a a b mohou teoreticky nabývat libovolných reálných hodnot, ale prakticky jsou lidským faktorem.



Obrázek 10. Komponenty barevného modelu CIELAB (Adobe Systems Inc., 2000a).

Transformaci souřadnic CIE 1931 XYZ [X, Y, Z] do CIELAB [L, a, b] lze realizovat soustavou [3]:

$$\begin{aligned} L &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a &= 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b &= 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{aligned} \quad [3]$$

kde

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t}, & \text{jestliže } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^3 t + \frac{4}{29}, & \text{jinak} \end{cases}$$

a X_n, Y_n, Z_n jsou souřadnice referenčního bílého bodu.

Zpětná transformace souřadnic CIELAB [L, a, b] do CIE 1931 XYZ [X, Y, Z] se realizuje inverzní funkcí f^{-1} . Výsledná soustava [4] tedy zní:

$$\begin{aligned} Y &= Y_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L + 16)\right) \\ X &= X_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L + 16) + \frac{1}{500} a\right) \\ Z &= Z_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L + 16) - \frac{1}{200} b\right) \end{aligned} \quad [4]$$

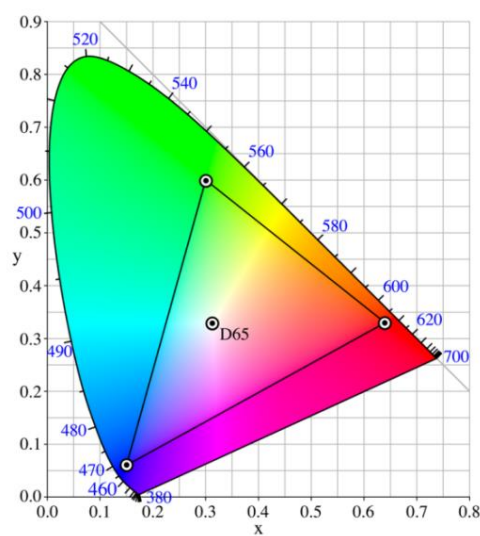
kde

$$f^{-1}(t) = \begin{cases} t^3, & \text{jestliže } t > \frac{6}{29} \\ 3\left(\frac{6}{29}\right)^2 \left(t - \frac{4}{29}\right), & \text{jinak} \end{cases}$$

a X_n, Y_n, Z_n jsou souřadnice referenčního bílého bodu.

Pro zobrazování barev na monitorech se používá barevný model RGB, jehož princip je založen na skládání tří barevných složek různé intenzity: červené (R z angl. *red*), zelené (G z angl. *green*) a modré (B z angl. *blue*). Mezi nejčastěji používané prostory založené na RGB modelu patří *sRGB*. Barevný prostor *sRGB* byl vyvinut v roce 1996 pro prohlížení grafiky na internetu (Stokes et al., 1996) a doposud je považován za standard, jehož gamut dokáže zobrazit většina běžně používaných monitorů.

Barevné složky prostoru *sRGB*, který je popsán standardem IEC 61966-2-1:1999, jsou definovány v referenčním prostoru CIE 1931 XYZ souřadnicemi $[x, y, Y]$: $R[0,64; 0,33; 0,2126]$, $G[0,30; 0,60; 0,7152]$, $B[0,15; 0,06; 0,0722]$ a bílým bodem $D65[0,31; 0,32; 1,0]$ (W3C, 1995) (obr. 11).



Obrázek 11. Barevné složky prostoru *sRGB* v chromatickém diagramu CIE 1931 XYZ.

Transformace souřadnic CIE 1931 XYZ [X, Y, Z] do sRGB [R, G, B] lze realizovat soustavou [5] (Lindbloom, 2012a):

$$\begin{bmatrix} R_{lin} \\ G_{lin} \\ B_{lin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2406 & -1,5372 & -0,4986 \\ -0,9689 & 1,8758 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad [5]$$

$$R = \begin{cases} 12,92 R_{lin}, & \text{jestliže } R_{lin} \leq 0,0031308 \\ (1 + 0,055)^{12} \sqrt{R_{lin}^5} - 0,055, & \text{jinak } R_{lin} > 0,0031308 \end{cases}$$

$$G = \begin{cases} 12,92 G_{lin}, & \text{jestliže } G_{lin} \leq 0,0031308 \\ (1 + 0,055)^{12} \sqrt{G_{lin}^5} - 0,055, & \text{jinak } G_{lin} > 0,0031308 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 12,92 B_{lin}, & \text{jestliže } B_{lin} \leq 0,0031308 \\ (1 + 0,055)^{12} \sqrt{B_{lin}^5} - 0,055, & \text{jinak } B_{lin} > 0,0031308 \end{cases}$$

kde R_{lin} , G_{lin} , B_{lin} jsou hodnoty před gamma korekcí a nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, výsledné souřadnice sRGB [R, G, B] také nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

Zpětná transformace souřadnic sRGB do CIE 1931 XYZ lze realizovat soustavou [6] (Lindbloom, 2012a):

$$R_{lin} = \begin{cases} \frac{R}{12,92}, & \text{jestliže } R \leq 0,04045 \\ \sqrt[5]{\frac{(R+0,055)^{12}}{1+0,055}}}, & \text{jinak } R > 0,04045 \end{cases} \quad [6]$$

$$G_{lin} = \begin{cases} \frac{G}{12,92}, & \text{jestliže } G \leq 0,04045 \\ \sqrt[5]{\frac{(G+0,055)^{12}}{1+0,055}}}, & \text{jinak } G > 0,04045 \end{cases}$$

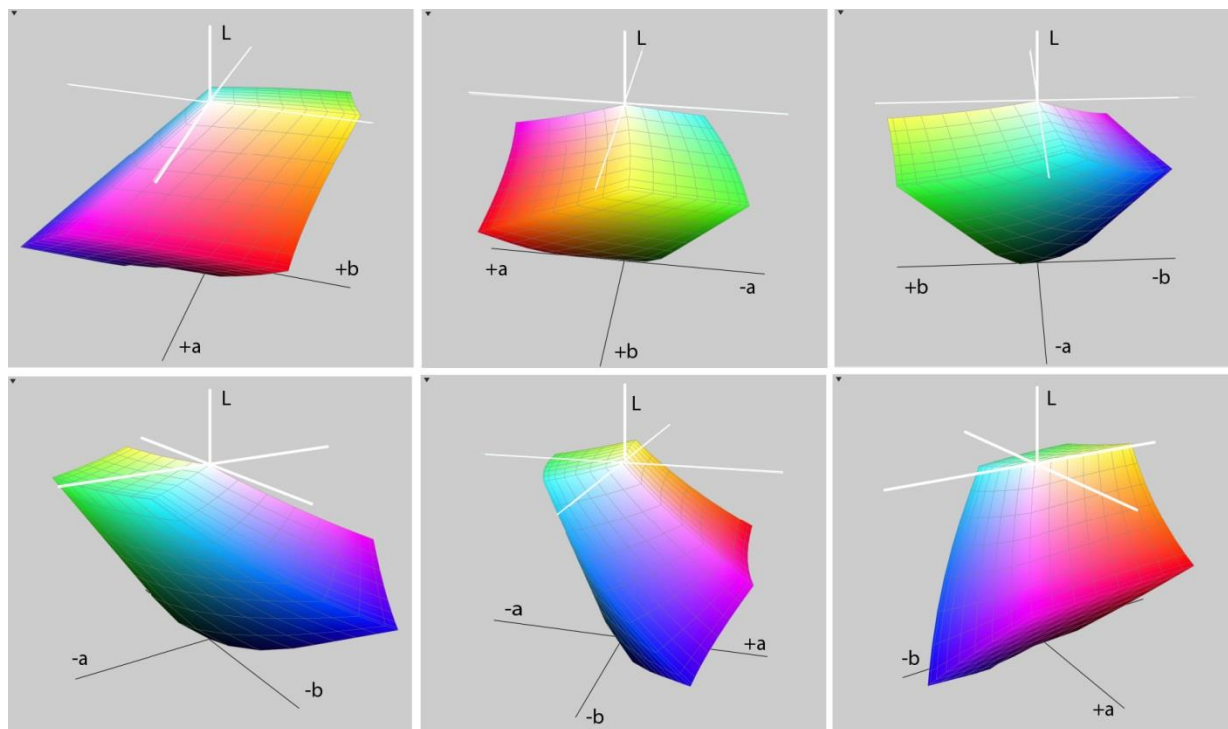
$$B_{lin} = \begin{cases} \frac{B}{12,92}, & \text{jestliže } B \leq 0,04045 \\ \sqrt[5]{\frac{(B+0,055)^{12}}{1+0,055}}}, & \text{jinak } B > 0,04045 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{lin} \\ G_{lin} \\ B_{lin} \end{bmatrix}.$$

kde R_{lin} , G_{lin} , B_{lin} jsou hodnoty po opačné gamma korekci a nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, vstupní souřadnice sRGB [R, G, B] také nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

Uvedené vztahy [5] a [6] obsahují přepočty vůči standardnímu referenčnímu bílému bodu D65 a gamma korekci, která delinearizuje jas barev hodnotou $\gamma = 2,2$.

Zobrazení gamutu sRGB v percepčně lineárním prostoru CIELAB umožňuje představit si relativní množství rozeznatelných barev v různých směrech. Tvar sRGB je nepravidelný; například s rostoucí vzdáleností od osy L roste množství rozlišitelných odstínů barvy od nesaturované po saturovanou (obr. 12).



Obrázek 12. Vizualizace gamutu sRGB v percepčně lineárním prostoru CIELAB.

3.4 Metody výpočtu barevné vzdálenosti

Lidskou schopnost posoudit rozdíl mezi barvami je možné kvantifikovat metrikou *barevná vzdálenost*, kterou zavedla Mezinárodní komise pro osvětlení (z franc. *Commission internationale de l'éclairage*, CIE). Současně s postupným vývojem barevných modelů se zdokonalovaly i výpočty barevné vzdálenosti, pro niž se vžilo označení ΔE vycházející z německého pojmu *Empfindung*, který se do češtiny překládá jako *počitek* (Robertson, 1990).

Podle Wermana (2012) jsou pro výpočet barevné vzdálenosti nejvíce využívány metody CIE76 (ΔE_{ab}) a CIEDE2000 (ΔE_{00}). Přestože je metoda CIE76 v současnosti považována za ne zcela dokonalou metodu výpočtu barevné vzdálenosti (především v oblasti vysoce saturovaných barev), je díky své jednoduchosti stále hojně využívána (Szafir et al., 2014).

Metoda CIE76 je založena na výpočtu euklidovské vzdálenosti ΔE_{ab} dvou barev určenými souřadnicemi prostoru CIELAB $[L_1, a_1, b_1]$ a $[L_2, a_2, b_2]$ podle vztahu [7] (CIE, 2012c):

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}. \quad [7]$$

Přesnější, avšak mnohem složitější výpočet barevné vzdálenosti, umožňuje metoda CIEDE2000, která je popsána vztahem [8] (Sharma et al., 2005). V porovnání s jinými metodami výpočtu barevné vzdálenosti, CIEDE2000 může být aplikována na výpočet jak velmi malých ($\Delta E_{00} < 1$), tak i velkých ($\Delta E_{00} > 10$) barevných vzdáleností (Carter a Huertas, 2009). Z tohoto důvodu byla metoda CIEDE2000 aplikována ve všech výpočtech disertačního výzkumu.

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}} \quad [8]$$

kde k_L , k_C a k_H jsou parametrické koeficienty upravující vztah podle prostředí pozorovatele, S_L , S_C a S_H jsou váhové koeficienty pro jas, sytost resp. tón a R_T je rotační faktor upravující odchylku v oblasti modré barvy (Luo et al., 2001) a dále platí:

$$\begin{aligned} C_{1,ab} &= \sqrt{(a_1)^2 + (b_1)^2} & C_{2,ab} &= \sqrt{(a_2)^2 + (b_2)^2} \\ \bar{C}_{ab} &= \frac{C_{1,ab} + C_{2,ab}}{2} \\ G &= 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^7}{\bar{C}_{ab}^7 + 25^7}} \right) \\ a'_1 &= (1 + G)a_1 & a'_2 &= (1 + G)a_2 \\ C'_1 &= \sqrt{(a'_1)^2 + (b_1)^2} & C'_2 &= \sqrt{(a'_2)^2 + (b_2)^2} \end{aligned}$$

$$h'_1 = \operatorname{atan} 2(b_1, a'_1) = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{b_1}{a'_1}\right), & b_1 > 0, a'_1 \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b_1}{a'_1}\right) + 180^\circ, & b_1 < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b_1}{a'_1}\right) + 360^\circ, & b_1 > 0, a'_1 < 0 \\ 90^\circ, & b_1 = 0, a'_1 > 0 \\ 270^\circ, & b_1 = 0, a'_1 < 0 \\ 0^\circ, & b_1 = 0, a'_1 = 0 \end{cases}$$

$$h'_2 = \operatorname{atan} 2(b_2, a'_2) = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{b_2}{a'_2}\right), & b_2 > 0, a'_2 \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b_2}{a'_2}\right) + 180^\circ, & b_2 < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b_2}{a'_2}\right) + 360^\circ, & b_2 > 0, a'_2 < 0 \\ 90^\circ, & b_2 = 0, a'_2 > 0 \\ 270^\circ, & b_2 = 0, a'_2 < 0 \\ 0^\circ, & b_2 = 0, a'_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Delta L' = L_2 - L_1$$

$$\Delta C' = C'_2 - C'_1$$

$$\Delta h' = \begin{cases} 0, & C'_1 C'_2 = 0 \\ h'_2 - h'_1, & C'_1 C'_2 \neq 0, |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) - 360^\circ, & C'_1 C'_2 \neq 0, (h'_2 - h'_1) > 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) + 360^\circ, & C'_1 C'_2 \neq 0, (h'_2 - h'_1) < -180^\circ \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)$$

$$\bar{L}' = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_1 + C'_2}{2}$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h'_1 + h'_2}{2}, & C'_1 C'_2 \neq 0 \wedge |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ \frac{h'_1 + h'_2 + 360^\circ}{2}, & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \wedge (h'_1 + h'_2) < 180^\circ \\ \frac{h'_1 + h'_2 - 360^\circ}{2}, & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \wedge (h'_1 + h'_2) \geq 360^\circ \\ h'_1 + h'_2, & C'_1 C'_2 = 0 \end{cases}$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,2 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$\Delta\theta = 30e^{-\left(\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right)^2}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^*{}^7}{\bar{C}_{ab}^*{}^7 + 25^7}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0,0045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

Subjektivní hodnocení, které umožňuje představit si, jak lidé vnímají různé hodnoty ΔE_{00} vytvořili Yang et al. (2012), a je uvedeno v tabulce 1. Nejmenší rozdíl mezi dvěma podněty (zrakovými, sluchovými, chuťovými, čichovými či hmatovými) různé intenzity, který vede ke vzniku dvou počitků či vjemů se označuje jako *relativní* nebo *rozdílový počitkový práh* (v angl. *Just Noticeable Difference*, JND). JND se definuje jako změna velikosti podnětu, kterou je subjekt schopen zaregistrovat v 50 % pokusů (Hunt, 2009).

Pro barvy není JND ustáleno; různí autoři uvádějí různé hodnoty. Například Yang et al. (2012) uvádí $\Delta E_{00} = 0,5$, Linhares et al. (2008) $\Delta E_{00} = 0,6$, Mahy et al. (1994) $\Delta E_{ab} = 2,3$, Hill et al. (1997) $\Delta E_{ab} = 2,15$.

Tabulka 1. Subjektivní hodnocení barevné vzdálenosti vypočítané metodou CIEDE2000 (Yang et al. 2012).

ΔE_{00} min	ΔE_{00} max	percepce barevné vzdálenosti
0,0	0,5	stěží
0,5	1,5	nepatrně
1,5	3,0	znatelně
3,0	6,0	citelně
6,0	12,0	hodně
12,0	24,0	velmi hodně
24,0	více	silně

Při kartografické vizualizaci jsou hodnoty barevné vzdálenosti blízké JND pro odlišení znaků pravděpodobně nevhodné, především pokud jsou obklopeny dalšími grafickými prvky. Nedostatečná barevná vzdálenost znaků zhoršuje celkovou čitelnost mapy a tedy schopnost uživatelů získat informace (Chesneau, 2007; Steinrücken a Plümer, 2013; Stigmar, 2010). Na druhou stranu je v některých případech vhodné aplikovat světlejší odstíny barev s navzájem nižší barevnou vzdáleností (především při konstrukci barevných stupnic), aby bylo možné do mapy umístit další prvky (např. popis, bodové a liniové znaky, diagramové znaky), které by na tmavém podkladu mohly zaniknout (Brychtová a Çöltekin, 2014).

3.5 Systém správy barev

V ideálním světě by každé zařízení pro pořízení, manipulaci i reprodukci grafického záznamu zobrazovalo barvy shodně. Bohužel tomu tak v praxi není, a proto se stává, že například jediná mapa může mít na různých monitorech, ale i po vytištění na různých tiskárnách, zcela odlišnou barevnost.

Tento problém se snaží vyřešit tzv. *systém správy barev* (v angl. *Color Management System*, CMS). Podle Adobe (Adobe Systems Inc., 2000b) se systémem správy barev rozumí *sada softwarových nástrojů zajišťujících kontrolovanou konverzi mezi barevnými výstupy různých zařízení (fotoaparátů, skenerů, monitorů, dataprojektorů, televizí, tiskových strojů) s cílem zajistit konzistentní barvy v celém procesu práce s barevným obrazem*.

V kontextu disertačního výzkumu je dodržování principů CMS klíčové pro zabezpečení maximální kontroly testovaných hodnot barevné vzdálenosti a následná aplikace výsledků výzkumu v praxi.

Z potřeby sjednocení postupů při správě barev bylo v roce 1993 založeno *Mezinárodní konsorcium pro barvu* (v angl. *International Color Consortium*, ICC), jehož hlavním výstupem bylo vytvoření specifikace ICC profilu, který je v současnosti považován za mezinárodní standard ISO 15076-1:2005 (ICC, 2014).

Klíčovou myšlenkou používání systému správy barev (dále jen CMS) je vysvětlování významu barvy. Pokud CMS dostane informaci o tom, jaké RGB souřadnice určí scanner při snímání určité barvy (definované v referenčním, tedy na zařízení nezávislém barevném prostoru, např. CIELAB), a zároveň, jakou barvu produkuje monitor, pokud mu jsou poslány určité RGB souřadnice, pak také dokáže vypočítat nové RGB souřadnice, které je třeba monitoru poslat, aby vyprodukoval stejné barvy, které nasnímal skener (Chavez a Blatner, 2008).

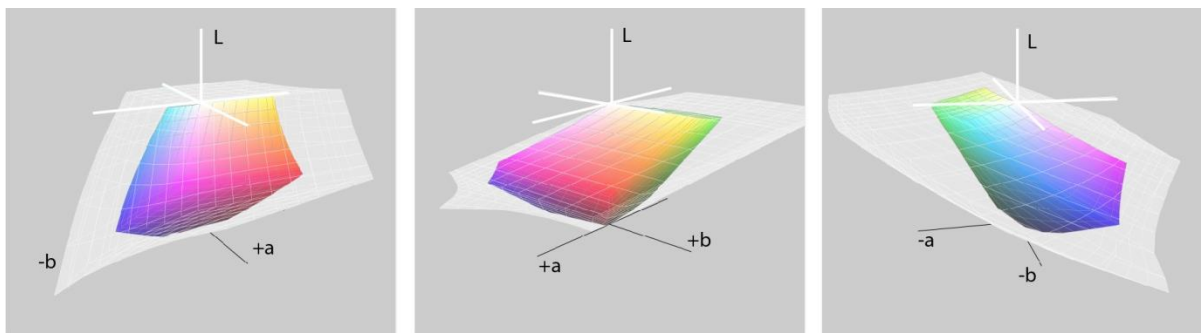
Stejný princip funguje i při tisku. Pokud víme, jaká barva se vytiskne, když tiskárně pošleme určité zadání v CMYK, pak také dokážeme na monitoru s pomocí CMS nastavit barvy, které odpovídají těm vytištěným.

Komunikaci mezi zařízeními s nesourodým barevným prostorem zajišťují právě *ICC profily*. ICC profily popisují *barevný prostor určitého zařízení* (např. monitoru, skeneru nebo tiskárny) a lze je získat kalibrací pomocí kalibrační sondy. ICC profily charakterizují barevné chování zařízení vůči referenčnímu barevnému prostoru CIELAB. Profil tak dokáže CMS předat informaci, že například „toto je ta nejčervenější červená o souřadnicích RGB [255, 0, 0], kterou tento konkrétní monitor dokáže zobrazit a odpovídá souřadnicím CIELAB [54, 80, 69]“. Bez přiřazeného ICC profilu by definice barvy prostřednictvím souřadnic RGB, HSL či CMYK neměla žádný konkrétní význam.

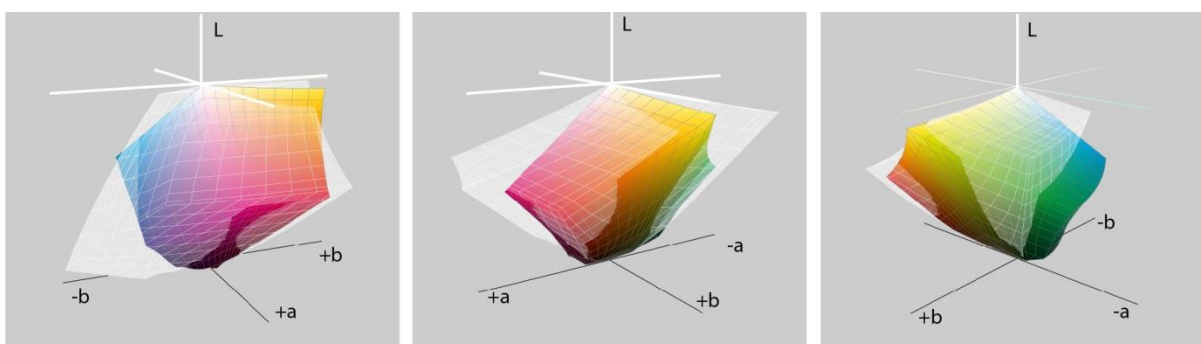
Kromě výše uvedeného jsou ICC profily určeny i pro popis barevných prostorů, které nemají přímou vazbu na konkrétní zařízení, ale používají se jako standardizované pracovní barevné prostory při úpravě grafických výstupů (např. sRGB, Adobe RGB, ProPhoto RGB a další). Běžnou praxí je, že se grafika s vloženým přístrojovým ICC profilem nejprve převede do vhodného virtuálního barevného profilu, kde je dále zpracována.

Při konverzi mezi barevnými prostory dochází většinou ke ztrátě určitého množství informací. Je to způsobenou odlišnou velikostí barevných prostorů (tzv. *gamutů*, které představují kompletní rozsah všech reprodukovatelných barev), mezi kterými se konverze provádí. Náhled a porovnání gamutů různých barevných prostorů umožňuje například program ColorSync (Apple Inc., 2015). Jeho prostřednictvím bylo provedeno srovnání často používaných barevných prostorů pro práci na monitoru i pro tisk: sRGB vs. ProPhoto RGB (obr. 13) a sRGB vs. Coated FOGRA 39⁴ (obr. 14). Barevnost ProPhoto RGB je ve všech oblastech jednoznačně větší než sRGB. Coated FOGRA 39 neumožňuje vytisknout tolik odstínů v oblasti červené a fialové, kolik dokáže zobrazit sRGB, ale naopak poskytuje větší škálu zeleno-modrých a žlutých odstínů, které na běžném monitoru o gamutu odpovídajícím přibližně sRGB nelze zobrazit.

⁴ Coated FOGRA 39 (ISO 12647-2:2004) je standardizovaný barevný prostor určený pro účely tisku, který je založen na modelu CMYK. Tento profil je například používán při chystání dokumentů pro ofsetový tisk u Vydavatelství Univerzity Palackého.



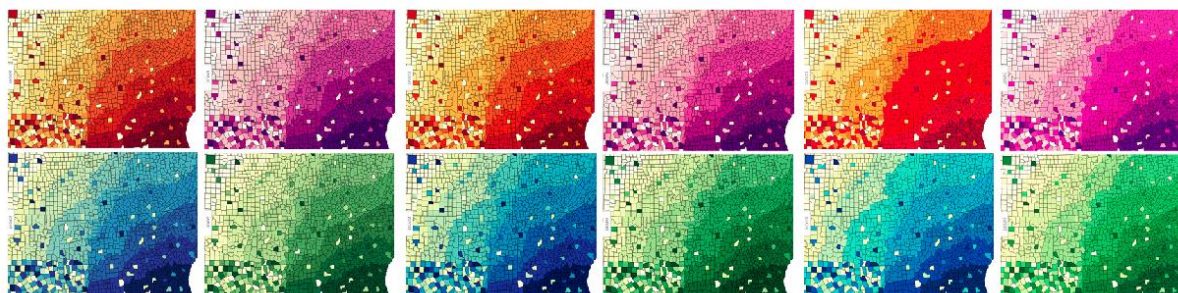
Obrázek 13. Srovnání barevnosti prostorů ProPhoto RGB (průhledný) a sRGB (barevný) v prostoru CIELAB. Barevný prostor sRGB je vlastní podmnožinou ProPhoto RGB.



Obrázek 14. Srovnání barevnosti prostorů sRGB (průhledný) a Coated FOGRA 39 (barevný) v prostoru CIELAB. V zeleno-modré a žluté oblasti Coated FOGRA 39 vystupuje mimo prostor sRGB; tyto odstíny nejsou na zařízení s gamutem sRGB zobrazitelné.

Rozdílnost mezi barevným rozsahem barevných prostorů sRGB, Adobe RGB a ProPhoto RGB je předvedena i na obrázku 15. Barvy obrázku byly definovány prostřednictvím souřadnic RGB bez správy barev a po té jim byl přiřazen pracovní barevný prostor. ProPhoto RGB má ze všech jmenovaných prostorů největší gamut a proto při stejných RGB hodnotách zobrazuje sytější barvy než jeho dva konkurenti.

Většina běžných monitorů je schopná zobrazovat víceméně barevný rozsah prostoru sRGB. Tento prostor byl definován i jako standard pro webové služby. Pokud ovšem pracujeme s profesionálním monitorem, který má mnohem větší gamut (např. přibližně ProPhoto RGB) a je tedy schopen zobrazit mnohem zářivější barvy, pak obrázky bez vloženého ICC profilu se na tomto monitoru zobrazí zcela nepřírozečně přesaturované (Pili, 2013).



Obrázek 15. Ukázka zobrazení barev ve třech barevných prostorech při zachování stejných souřadnic RGB: a) sRGB, b) Adobe RGB, c) ProPhoto RGB. Barevnost je pouze orientační. Obrázek byl pořízen na monitoru, který není schopný zobrazit celý gamut Adobe RGB ani ProPhoto RGB.

4 DC1-BAREVNÁ VZDÁLENOST V KARTOGRAFICKÉ PRAXI

Základní pravidla o správném používání barev na mapách jsou zakotvena v řadě kartografických učebnic (např. Slocum et al., 2008; Dent et al., 2009; Voženílek a Kaňok et al., 2011; Kaňok, 1999 a další). Tato pravidla vycházejí buď z vžitých konvencí, nebo jsou opřena o vědecké výsledky studií zaměřených na hodnocení čitelnosti map (viz podkapitola 3.1).

Pravidla o optimální hodnotě barevné vzdálenosti doposud neexistují, a proto kartografové při tvorbě map využívají existující nebo vlastní vzorníky, které jsou ověřené spíše letitou praxí než výzkumem.

Právě z důvodu absence exaktně podložených pravidel o barevné vzdálenosti na mapách je první dílčí cíl disertační práce zaměřen na výzkum přístupu zkušených kartografů k tvorbě map z hlediska výběru a reprodukce barev a na zjištění hodnot barevné vzdálenosti, které na mapách používají (i když nezáměrně). Součástí dílčího cíle je i hodnocení nástrojů pro správu barev vybraných kartografických programů.

Celkem byly provedeny tři studie:

1. *Experiences*: Výzkum současných postupů při tvorbě map
2. *ColMan*: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map
3. *ColDist*: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

4.1 Experiences: Výzkum současných postupů při tvorbě map

Řada autorů kartografických učebnic a vědeckých studií pocházející z akademické sféry se nevěnuje praktické kartografii. Zároveň autoři map, především z komerčního sektoru, mohou ve své praxi ztratit vazbu na moderní vědecké výsledky – buď se o ně nezajímají, nemají čas, přístup, nebo používají vlastní, letitou praxí ověřené postupy vedoucí k produktům, které jsou jejich zákazníci akceptováni. Proto kartografové necítí potřebu fungující postupy měnit.

Cílem předložené kvalitativní studie *Experiences* bylo zjistit současný stav problematiky používání a reprodukce barev v kartografii bez ohledu na jejich teoretickou opodstatněnost a způsob zpracování poznatků experimentální kognitivní kartografie v běžné praxi. Vzhledem k rozsáhlosti tématu byly vybrány tři zájmové okruhy, které byly studovány prostřednictvím on-line dotazníku:

- a) systém správy barev při tvorbě map,
- b) konstrukce barevných stupnic,
- c) využívání vědeckých poznatků v praxi.

4.1.1 Metody

Studium současných postupů při tvorbě map bylo provedeno kvalitativním fenomenologickým výzkumem prostřednictvím dotazníku. Protože nebylo možné se setkat se všemi účastníky osobně, vlastní výzkum byl proveden formou dotazníkového šetření s použitím otevřených, výběrových, stupnicových a dichotomických (ano/ne) otázek. Cílem dotazníku bylo zjistit názory kartografů na

studovanou problematiku. Proto je řada položek dotazníku koncipována jako otevřená opověď s možností vyjádřit svůj názor.

Dotazník studie *Experiences* obsahuje celkem 20 otázek rozdělených do pěti částí. Tabulka 2 obsahuje přehled všech kladených otázek včetně jejich typizace podle Wilkinsona a Birminghama (2003). Otázky včetně možných odpovědí jsou součástí vázané přílohy 1.

Žádná z otázek nebyla povinná. Dotazník byl vytvořen s využitím Google Forms. Otázky byly kladeny v angličtině.

Tabulka 2. Struktura dotazníku studie Experiences.

Část	Otázky	Typ otázky
A. About you	A1. For what purpose you are creating maps? A2. Could you specify maps you are producing?	stupnicová otevřená
B. Your working environment	B1. Could you evaluate your knowledge about Colour Management? B2. Do you think is it important, that cartographers pay attention to precise colour management? B3. Could you give a reason to your above statement? B4. Do you personally calibrate your screen? B5. Could you name the software which you use to finish a look (especially colours) of your maps?	stupnicová výběrová otevřená dichotomická otevřená
C. Your workflow	C1. What is the media of maps you are creating? C2. How do you ensure, that your DIGITAL maps' colours appear the same on your screen and also users' screens? C3. How do you ensure, that your PRINTED maps' colours appear the same on your screen and also on the paper?	stupnicová otevřená otevřená
D. Designing colour schemes	D1. When designing colour schemes do you use ColorBrewer 2.0? D2. Do you use any other colour swatch to help yourself design colour schemes? D3. What is the maximum number of shades you apply to your colour schemes? D4. Any comment to the above question? D5. Have you ever created map with 'continuous' colour scheme (no classes)? D6. Do you purposely optimise your maps for users who are suffering by colour vision distortion (colour blindness)?	výběrová otevřená stupnicová otevřená dichotomická dichotomická
E. You and science	E1. Could you name scientific articles whose results you have applied while designing your maps E2. What influenced your ability to create and design a map? E3. What do you think that would contribute to a higher usability of research findings (from cognitive cartography and users issues) in commercial cartography?	otevřená stupnicová otevřená

4.1.2 Účastníci dotazníku

K účasti na studii byli pozváni vybraní kartografové, kteří mají podle autorky dostatečnou praxi v tvorbě map používaných širokou veřejností.

Dotazníku se zúčastnilo osm kartografů, kteří souhlasili s uvedením jejich jména a organizace, pro niž pracují: René Sieber (Atlas of Switzerland, ETH Zurich), Christopher Wesson (Ordnance Survey, Southampton), Jan Ptáček (Kartografie Praha), Josef Rančák (Geodézie OnLine), Bohumil Ptáček (kartograf živnostník, Olomouc), Jaroslav Burian (kartograf živnostník, Olomouc), Jan Rykr (kartograf živnostník, Samoa) a Alena Vondráková (Univerzita Palackého v Olomouci). Respondentům bylo slíbeno, že jejich jméno nebude spojeno s žádnou konkrétní odpovědí, pro případ, že by se mohlo jednat o pracovně citlivou informaci.

Většina dotázaných vytváří mapy pro komerční účely: 5 účastníků se komerční kartografii věnuje 100 %, dva účastníci uvedli, že se komerční kartografii věnují na 80 resp. 60 %, přičemž zbývající část věnují tvorbě map pro akademické účely. Pouze jeden z dotázaných se věnuje tvorbě map pro akademické účely na 100 %.

4.1.3 Výsledky dotazníkového šetření

Výsledky kvalitativního výzkumu jsou uvedeny jednotlivě pro klíčové otázky dotazníku.

Otázky A1 a A2 byly určeny k zařazení účastníků podle charakteru jejich činnosti.

Sekce B (otázky B1-B5) měla za cíl postihnout znalosti respondentů o procesu správy barev a používaných programech k tvorbě map:

B1. Could you evaluate your knowledge about Colour Management?

Sedm účastníků ohodnotilo své znalosti problematiky správy barev jako průměrné nebo dobré. Jeden účastník uvedl, že o systému správy barev nemá žádné znalosti.

B2. Do you think is it important, that cartographers pay attention to precise colour management?

Pět dotázaných se domnívá, že dodržování systému správy barev je v kartografii nezbytné. Tři uvedli, že záleží na konkrétním případě. Jejich vysvětlení (v rámci otevřené otázky B3) je více méně shodné: Při tvorbě kartogramů s vysokým počtem barevných intervalů je správa barev na místě, především u tištěných map. U digitálních je správa barev problematická, protože nelze 100% kontrolovat podmínky, v jakých uživatel mapu prohlíží. Ale například tvorba barevně jednoduché mapy (topografické, turistické) správu barev nevyžaduje. Není důležité, zda je barevnost mapy přesně taková, jakou autor zamýšlel. Důležité je, aby výsledek byl poutavý.

B4. Do you personally calibrate your screen?

Pouze dva dotázaní odpověděli, že monitor pravidelně kalibrují.

Autorčin komentář: i přes to, že většina respondentů považuje systém správy barev za nezbytnost, tak ho ve svých postupech zcela nepraktikuje. Kalibrace monitoru je totiž důležitou součástí systému správy barev.

B5. Could you name the software which you use to finish a look (especially colours) of your maps?

Sedm z dotázaných uvedlo, že k finálním úpravám map používají mimo jiné některý z produktů Adobe Creative Suite (Illustrator, Photoshop, nebo InDesign). Dva dotázaní specifikovali, že vizualizaci dat provádějí v ArcGIS for Desktop, ale finální úpravy většinou provádějí v Adobe Creative Suite. Mezi další zmíněné programy k finálním úpravám patří OCAD a Corel Draw.

Autorčin komentář: Všechny produkty Adobe Creative Suite podporují správu barev a jejich použití pro finální úpravu map (především barev) je opodstatněné. Z odpovědí ale nevyplývá, zda tyto programy používají kvůli možnosti správy barev, nebo využití speciálních grafických efektů, které nejsou v GIS programech umožněny. Pokud záleží na barevnosti finálního produktu, není vhodné pro úpravy používat žádný ze zmíněných GIS programů (ArcGIS for Desktop, OCAD), protože ty správu barev neumožňují (viz podkapitola 0).

Sekce C (otázky C1-C4) byla zaměřena na popis postupů, které autoři map používají v souvislosti s barvami:

C1. What is the media of maps you are creating?

Šest dotázaných tvoří 80 % tištěných a 20 % digitálních map, jeden dotázaný má tento poměr opačný (20 % tištěných a 80 % digitálních) a jeden vytváří pouze digitální mapy.

C2. How do you ensure, that your DIGITAL maps' colours appear the same on your screen and also users' screens?

Běžným postupem pro kontrolu vzhledu digitálních map, který uvedlo šest dotázaných, je zobrazení výsledků na řadě odlišných monitorů a subjektivní posouzení barevnosti a rozlišitelnosti barev. Jeden z dotázaných problém různě barevných výstupů neřeší. Všeobecným názorem je, že barevnost na uživatelských monitorech nelze kontrolovat.

Autorčin komentář: Uvedený postup (kontrola na různých monitorech) je patrně v praxi zcela funkční a nelze mu nic vytknout. Webové mapy jsou v dnešní době publikovány především prostřednictvím internetových prohlížečů, z nichž některé podporují ICC profily (viz podkapitola 3.5), proto by teoreticky za určitých splněných podmínek (používání prohlížeče s podporou ICC profilů, kalibrace kartografova i uživatelského monitoru) bylo možné kontrolovat barevné výstupy na uživatelských monitorech. Otázkou je, zda by komplikovaný postup měl v praxi opodstatnění.

C3. How do you ensure, that your PRINTED maps' colours appear the same on your screen and also on the paper?

Pět dotázaných uvedlo, že pro kontrolu barevnosti tištěných produktů žádá nátisky z tiskárny, která bude pro výrobu map použita, a podle nich upravuje barevnost výstupů. Jeden z nich navíc

používá vzorník barev CMYK, podle kterého vybere odstíny do mapy. Jiný dotázaný pak provádí nátisky na několika tiskárnách. Pouze jeden dotázaný žádá od tiskaře ICC profil tiskového stroje, aby mohl na svém monitoru simulovat výslednou barevnost.

Autorčin komentář: Při produkci tištěných map vždy záleží na technologii tisku (digitální, ofsetový, tisk přímými barvami) i na konkrétní tiskárně. Hodnocení barevnosti podle nátisků z několika tiskáren nemá smysl. Simulace barevnosti na základě ICC profilu tiskového stroje společně s provedením kontrolních nátisků je nejlepším možným postupem.

Sekce D (otázky D1-) byla zaměřena na postup při konstrukci barevných schémat:

D1. When designing colour schemes do you use ColorBrewer 2.0?

Žádný z dotázaných nevyužívá nástroj Color Brewer v plném rozsahu, přesto se jím nechávají inspirovat. Jeden z účastníků o tomto nástroji ještě neslyšel.

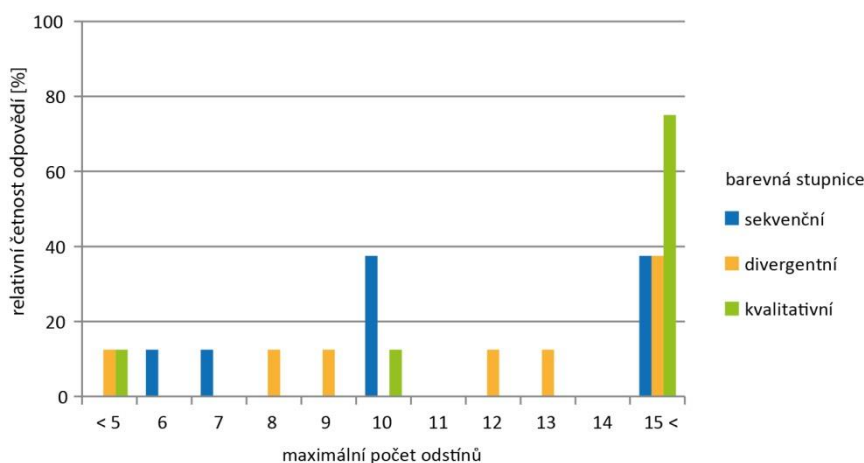
Autorčin komentář: ColorBrewer 2.0 je v komunitě kartografů známým webovým nástrojem pro tvorbu barevných schémat a jeho princip je podložen odbornou literaturou. V praktické kartografii ale patrně neplní všechny požadavky a proto ho autoři map využívají jako inspiraci.

D2. Do you use any other colour swatch to help yourself design colour schemes?

Tři dotázaní používají barevné vzorníky vyvinuté jejich vlastní společností. Další tři používají barevné stupnice a schémata, které pro vizualizaci dat nabízí ArcMap a případně QGIS. Mezi zmiňované nástroje využívané pro konstrukci vlastních stupnic patří Adobe Kuler.

D3. What is the maximum number of shades you apply to your colour schemes?

Otázka měla za cíl zjistit, jaké je maximální počet barevných odstínů, které dotázaní použili pro sekvenční a divergentní stupnice a kvalitativní barevná schémata, bez ohledu na pravidla uváděná v kartografických učebnicích. Mezi odpověďmi (obr. 16) se objevují jak nízké a střední počty použitých odstínů (6-10), které víceméně respektují teoretická doporučení, tak i velmi vysoké (více než 15) - především pro kvalitativní barevná schémata.



Obrázek 16. Maximální počet barevných odstínů, které účastníci dotazníku použili na svých mapách podle typu barevného schématu.

D5. Have you ever created map with 'continuous' colour scheme (no classes)?

Pouze dva dotázaní nikdy nevytvořili a nepublikovali mapu s barevnou stupnicí bez kategorií.

D6. Do you purposely optimise your maps for users who are suffering by colour vision distortion (colour blindness)?

Dva dotázaní uvedli, že své mapy optimalizují pro osoby postižené poruchou barvocity, dva uvedli, že občas, a zbylí čtyři na to ohled neberou.

Poslední sekce E (otázky E1-E3) nebyla pro řešení disertační práce stěžejní. Jejím účelem bylo postihnout zdroje informací, které autoři map využívají k vlastnímu profesnímu vzdělávání.

E1. Could you name scientific articles (NOT books) whose results you have applied while designing your maps

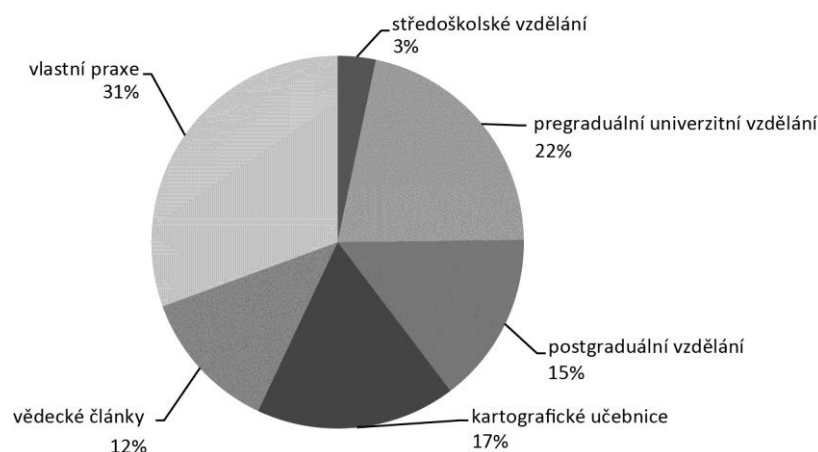
Žádný dotázaný nebyl schopen uvést vědecký článek, ze kterého čerpal informace pro svou praxi. Někteří dokonce uvedli, že vědecký článek nikdy nečetli. Dva účastníci zmínili, že využívají fóra a blogy, případně články z odborných (ne vědeckých) časopisů (konkrétně GeoBusiness).

E2. What influenced your ability to create and design a map?

Dotazovaní hodnotili, jaký význam měly různé faktory na jejich současné kartografické znalosti a schopnosti. Používaly při tom známky 1-5 (1= žádný význam, 5= velice významný zdroj znalostí). Udělené známky byly sečteny pro každý z faktorů a vypočteno jejich relativní zastoupení (obr. 17).

Z odpovědí vyplývá, že nejhodnotnějším zdrojem znalostí a zkušeností je vlastní praxe (metoda pokusu a omylu) a pregraduální (bakalářské a magisterské) studium na vysoké škole.

Komentář autorky: Je zajímavé, že v otázce E1 nebyl nikdo z dotázaných schopný uvést vědecké články, jejichž výsledky by využil v praxi, přesto je jejich významnost v získávání kartografických schopností nezanedbatelná.



Obrázek 17. Relativní hodnocení významu sledovaných faktorů na současné znalosti a schopnosti dotázaných kartografů.

E4. What do you think that would contribute to a higher usability of research findings (from cognitive cartography and users issues) in commercial cartography?

Všichni dotázaní se shodli, že praktická a teoretická kartografie jsou dva různé světy, které nejsou propojené. Častým doporučením bylo publikovat výsledky kartografického výzkumu nejen ve vědeckých časopisech, ale i jednodušší a populárnější formou prostřednictvím blogů a příspěvků do odborných časopisů typu GISportal.cz. Bylo dokonce navrženo zřídit specializovaný kartografický web pro školy, firmy a úřady s funkcí poradit tvůrcům map s jejich problémy. Jeden z účastníků navíc trefně podotknul, že řada kartografů nemá vůbec přístup do impaktovaných časopisů, takže by pomohlo publikovat minimálně formou *Open access*.

4.1.4 Shrnutí

Podstatným zjištěním provedené studie je, že jen malá část profesionálních kartografů má dostatečné znalosti o systému správy barev, z čehož vyplývá, že nevyužívají výhody, které systém správy barev může přinést. Výslednou barevnost svých map kartografové kontrolují vlastními nesystémovými postupy, které fungují. Je ale pravděpodobné, že s uplatněním systému správy barev by jejich postupy mohly být robustnější.

V disertační práci je kladen důraz na testování barevných schémat. V souvislosti s jejich tvorbou je velice často diskutován problém optimálního počtu rozeznatelných odstínů. Z výsledků dotazníku je patrné, že se praxe často liší od teoretických pouček, a kartografové si dovolí na mapách použít i více než 15 odstínů. Většina z nich navíc uvedla, že publikovali minimálně jednu mapu s plynulou stupnicí (bez kategorií).

Závažným, avšak předpokládaným, zjištěním je, že tvůrci map nevyužívají při své práci výsledky moderního výzkumu vzhledu map. Teoretická a praktická kartografie představuje v současnosti dva oddělené světy. V zájmu obou by bylo vhodné tyto dva světy propojit: kartografický výzkum by se měl zaměřit na problémy podnětené praktickými kartografy a své výsledky publikovat takovou formou, aby byly dostupné i mimo akademickou sféru.

4.2 ColMan: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map

Při hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map lze sledovat jediný atribut - zda daný program podporuje ICC profily, či nikoli. Základní princip systému správy barev byl uveden v podkapitole 3.5.

V tabulkách 3, 4 a 5 je uveden přehled programů hodnocených v rámci studie *ColMan* pro finální úpravu map, internetových prohlížečů a doplňkově ještě programů pro přípravu eye-tracking experimentů. Ke každému produktu je uvedeno, zda podporuje ICC profily ve verzi 2 a 4. Novější verze 4 poskytuje oproti starší verzi 2 jistá vylepšení ve smyslu účinnější a konstantnější barevné transformace, ale není zatím implementovaná do všech produktů, které podporují verzi 2 (Griffith, 2013). Produkty, které nepodporují verzi 2 ani 4, nejsou schopné ICC profily využít a pro zobrazení barev používají celý gamut monitoru, což může především u širokogamutových monitorů způsobit přesaturované barvy.

Hodnocení vybraných programů proběhlo testem, jehož princip je popsán v podkapitole 2.1.

Výběr testovaných GIS a kartografických programů byl určen především odpověďmi účastníků dotazníku (podkapitola 4.1.3). Ani jeden z otestovaných produktů správu barev nepodporuje. Proto autorka doporučuje tyto programy využívat pro správu a analýzu dat, ale pro finální úpravy a export do požadovaného formátu použít jiný program umožňující kontrolu barev (například některý z grafických programů z Adobe Creative Suite).

Tabulka 3. Podpora ICC profilů v grafických, GIS a kartografických programech.

Název produktu	podpora ICC v2	podpora ICC v4
Adobe Creative Suite CS6	ano	ano
CorelDRAW Graphics Suite X5	ano	ano
ArcGIS ArcMap 10.1	ne	ne
QGIS Dufour 2.0.1	ne	ne
Saga GIS 2.0.8	ne	ne
OCAD 11	ne	ne

Vzhled on-line map je ovlivněn internetovým prohlížečem. Internet Explorer 11 a Safari 5.1.7 podporují obě verze ICC profilů. Pokud má uživatel kalibrovaný monitor a prohlíží mapové soubory s definovaným ICC profilem, je zaručeno, že je bude vidět se stejnými barvami, které autor mapy zamýšlel. Podle World Wide Web Consortium (W3C) by všechny obrázky a prvky webových stránek bez vloženého profilu měly být prohlížečem zobrazovány tak, jako by měly přiřazený sRGB profil (W3C, 2015).

Tabulka 4. Podpora ICC profilů v internetových prohlížečích.

Název produktu	podpora ICC v2	podpora ICC v4
Internet Explorer 11	ano	ano
Google Chrome 39	ano	ne
Opera 26.0	ano	ne
Safari 5.1.7	ano	ano
Mozilla Firefox 34.0.5	ano	ne

V rámci disertačního výzkumu bylo provedeno několik eye-tracking experimentů, proto byly na podporu ICC profilů otestovány i programy pro přípravu a spouštění experimentů, které autorka přímo využívala, nebo k nim měla přístup. Ani jeden z testovaných programů ICC profily nepodporuje (tab. 5) a pro zobrazení barev stimulů používají celý gamut laboratorního monitoru.

Možnost správy barev v SMI Experiment Center, který je používán na Katedře geoinformatiky, byla diskutována přímo s oddělením uživatelské podpory SensoMotoric Instruments GmbH⁵. Společnost podporu ICC profilů v jejich produktech do budoucnosti neplánuje, protože od klientů doposud nedostala žádný podobný požadavek (kromě autorčina).

Kontrolované zobrazení barev ale není nemožné. Buď lze stimuly vytvářet s ohledem na ICC profil laboratorního monitoru, nebo pro promítání stimulů musí být využito jiné prostředí než vestavěný prohlížeč.

Tabulka 5. Podpora ICC profilů v eye-tracking programech pro tvorbu a spuštění experimentu.

Název produktu	podpora ICC v2	podpora ICC v4
SMI Experiment Center	ne	ne
Tobii Studio	ne	ne
Ogama	ne	ne

⁵ E-mailová konverzace s Thorstenem Ahlrichsem, listopad 2014

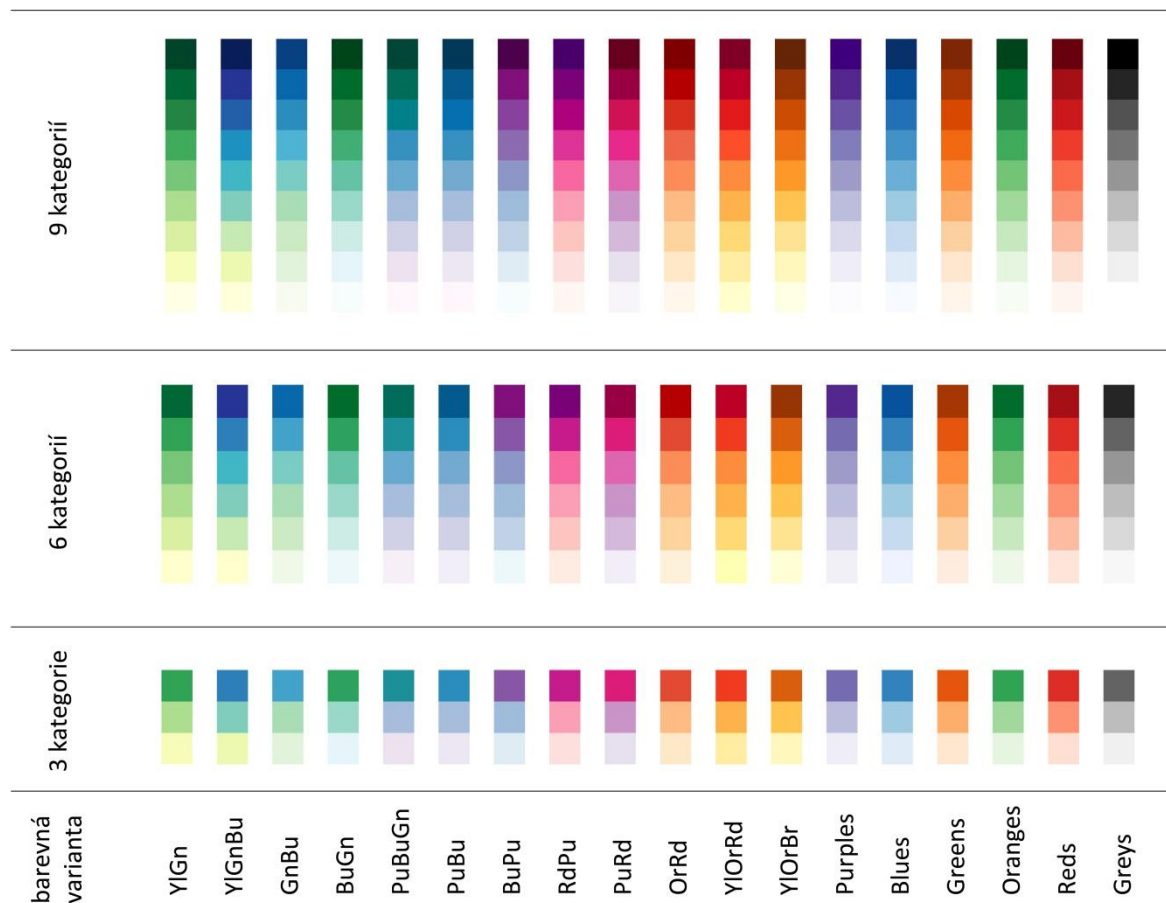
4.3 ColDist: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

Kartografický výzkum se doposud nezaměřil na empirické stanovení minimální efektivní hodnoty barevné vzdálenosti pro odlišení kartografických znaků. Steinrücken a Plümer (2013) ve své práci zaměřené na optimalizaci barevných kvalitativních i sekvenčních schémat pro webové mapy převzali minimální aplikovatelnou barevnou vzdálenost odpovídající 45 jednotkám CIELUV. V jiných podobně zaměřených studiích je konstrukce barevných stupnic založena na výběru jednotlivých odstínů z tzv. *barevných systémů* (např. Buard a Ruas, 2009; Christophe, 2008), které formou tabulek poskytují omezený počet odstínů (např. Munsellův barevný systém).

Jedním z nejvýznamnějších přínosů v oblasti tvorby barevných schémat je webový nástroj ColorBrewer 2.0 a s ním související publikace autorů Harrower a Brewer (např. Harrower a Brewer, 2003). Zmíněný nástroj poskytuje vzorník se specifikací 18 sekvenčních, 9 divergentních a 8 kvalitativních schémat o 3-12 intervalech, resp. kategoriích. Jednotlivé odstíny stupnic byly vybrány z Munsellových barevných tabulek (Brewer, 1989, viz podkapitola 3.3.2), takže přibližně odpovídají způsobu lidské percepce barev, ale nejsou konstruovány na matematicky přesně definovaných barevných prostorech (např. CIELAB) a nezohledňují moderní poznatky o vnímání barevné vzdálenosti.

Cílem studie *ColDist* bylo zjistit, jaké hodnoty barevné vzdálenosti jsou v současné kartografii běžně používané (i když nezáměrně). Bylo proto provedeno hodnocení stupnic vzorníku ColorBrewer 2.0. Tyto barevné stupnice nebyly před vznikem ColorBrewer 2.0 nikdy podrobeny uživatelskému testování a není tedy experimentálně ověřena jejich vhodnost pro použití na mapách. Přesto světová popularita tohoto nástroje potvrzuje jeho relevantnost, coby dobrého příkladu současného trendu kartografické vizualizace.

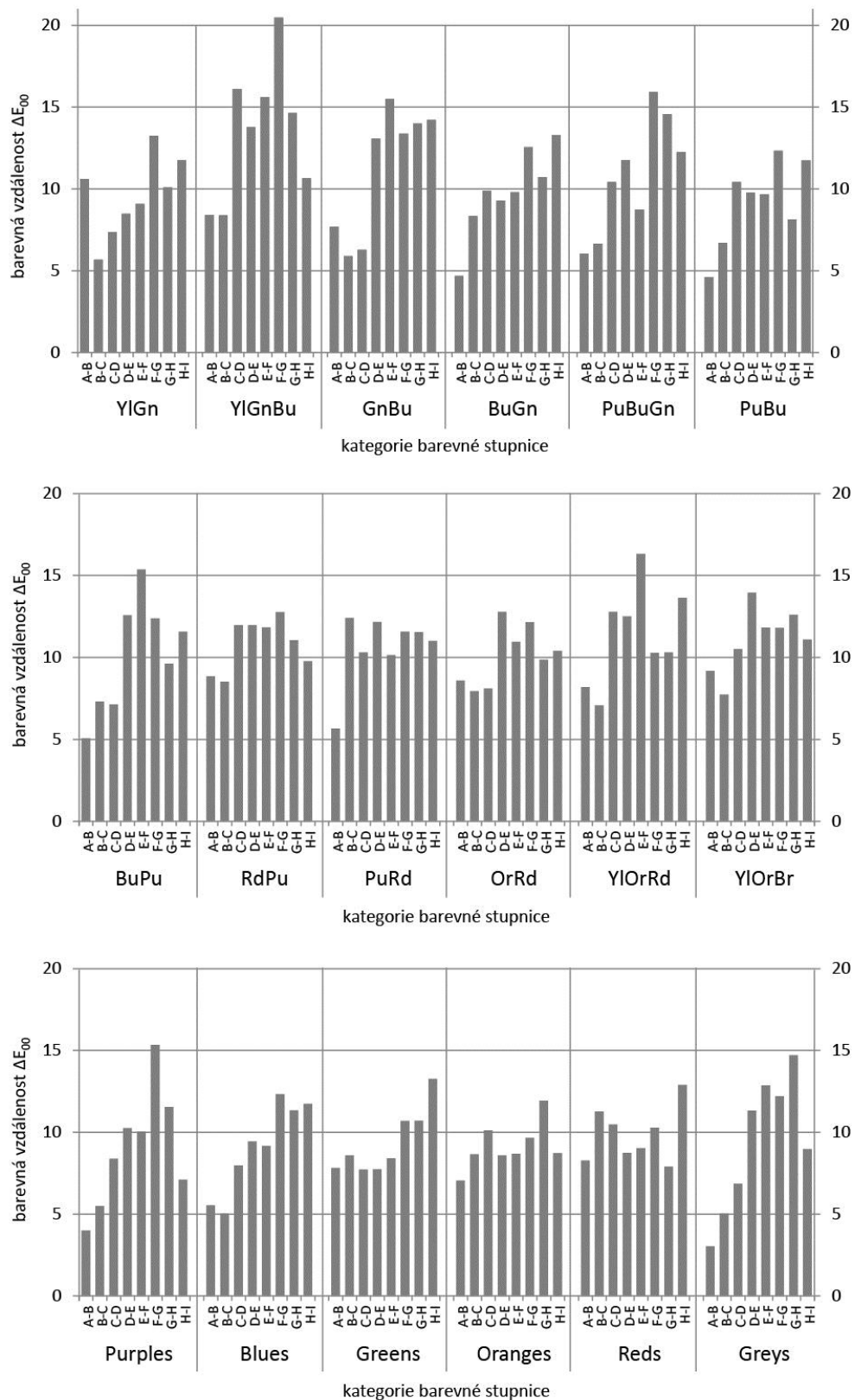
Při hodnocení ColorBrewer 2.0 byly zkoumány 3 sady sekvenčních barevných stupnic s 9, 6 a 3 intervaly označenými písmeny A-I od nejsvětějšího po nejtmaší v 18 barevných variantách (obr. 18). Sousedícím intervalům jednotlivých stupnic byla vypočítána jejich barevná vzdálenost metodou CIEDE2000, která je popsána v podkapitole 3.4.



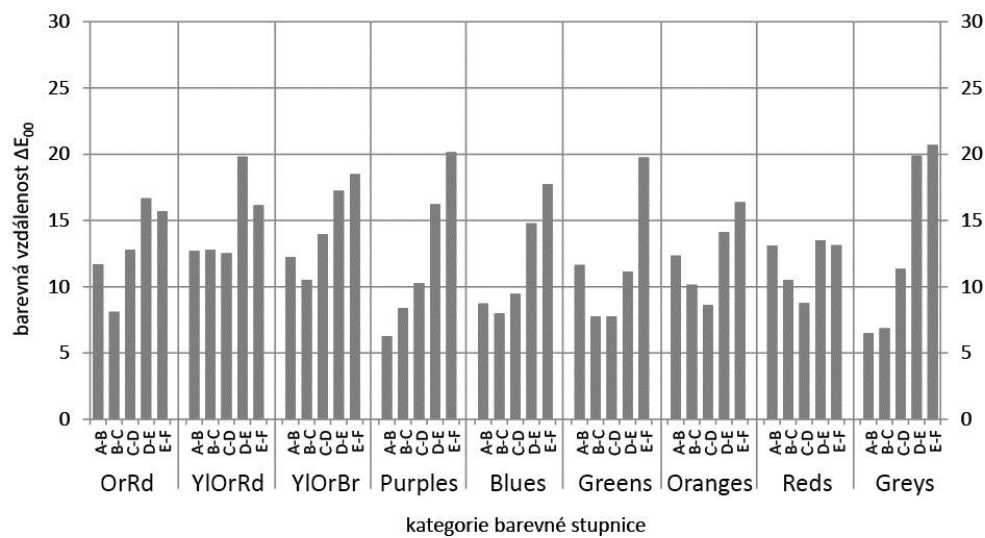
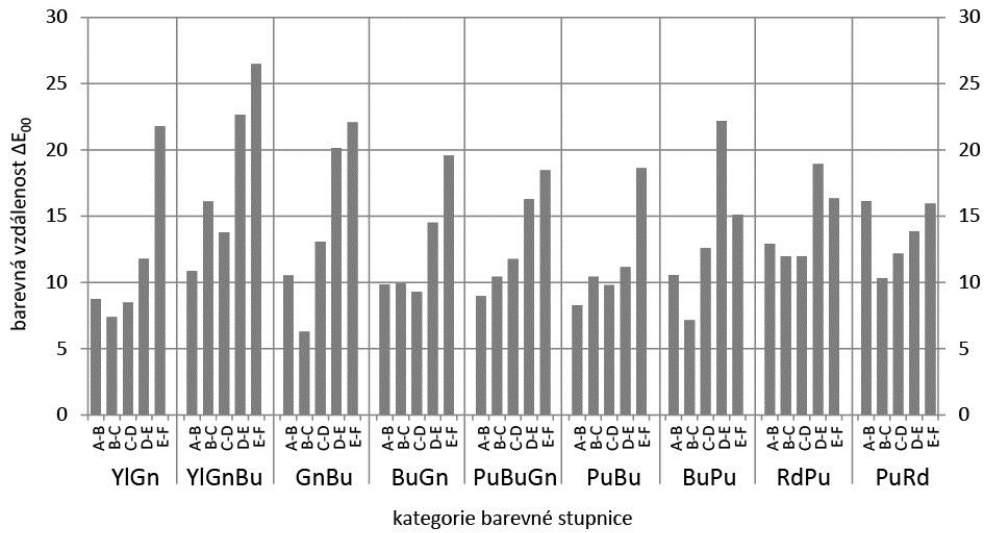
Obrázek 18. Přehled 18 barevných variant otestovaných sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0 se 3, 6 a 9 intervaly. Převzato z ColorBrewer 2.0.

Výsledky hodnocení barevných stupnic (viz obr. 19, 20 a 21) ukázaly, že barevná vzdálenost mezi intervaly není v rámci jednotlivých stupnic konstantní. Naopak barevné rozdíly sousedících párů, až na výjimky, výrazně kolísají. Hodnoty barevných vzdáleností se různí i napříč barevnými variantami. Ve velkém množství případů se barevná vzdálenost zvyšuje směrem k tmavším odstínům. To je patrné především u stupnic se 3 (všechny barevné varianty) a 6 intervaly (např. YlGnBu, PuBuGn, Purples, Blues nebo Greys). Snižování barevné vzdálenosti směrem k tmavším odstínům se nevyskytuje. U stupnic s 9 intervaly je častá výraznější barevná odlišnost mezi prostředními intervaly (např. YlGnBu, BuPu, RdPu nebo Purples). Opačná situace – malá barevná vzdálenost mezi prostředními intervaly – se vyskytuje například u stupnic PuRd, Oranges a Greens se 6 intervaly.

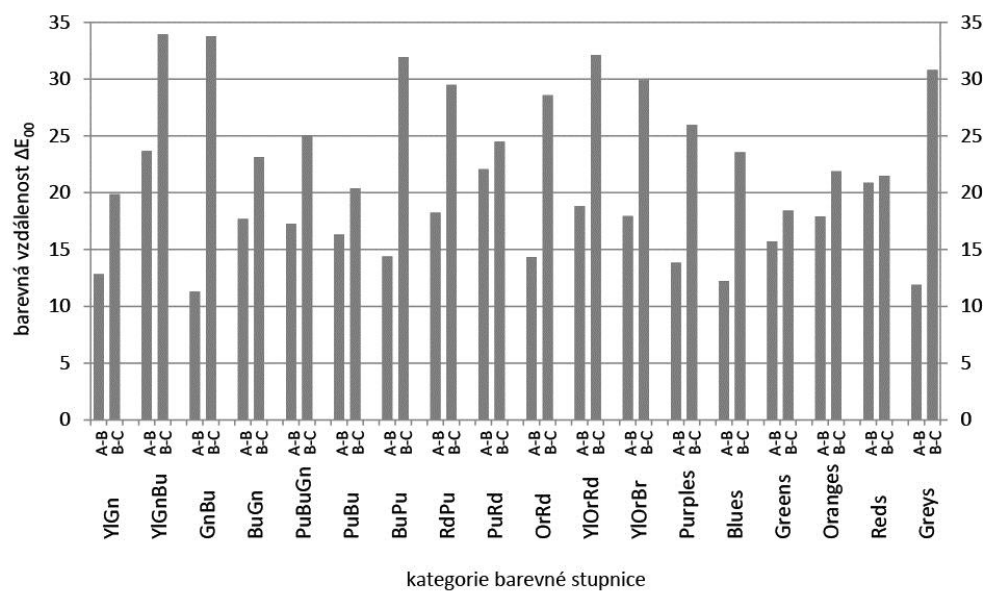
Stupnice s větším počtem intervalů jsou všeobecně (a předvídatelně) méně odlišené než ty ze stupnic s nižším počtem intervalů. Mediánová barevná vzdálenost ΔE_{00} stupnic s 9 intervaly je $Mdn = 10,28$ ($min = 3,04$; $max = 20,46$; obr. 22), se 6 intervaly je $Mdn = 12,41$ ($min = 6,24$; $max = 26,44$; obr. 23), zatímco se 3 intervaly je téměř dvojnásobná $Mdn = 20,61$ ($min = 11,26$; $max = 33,92$; obr. 24).



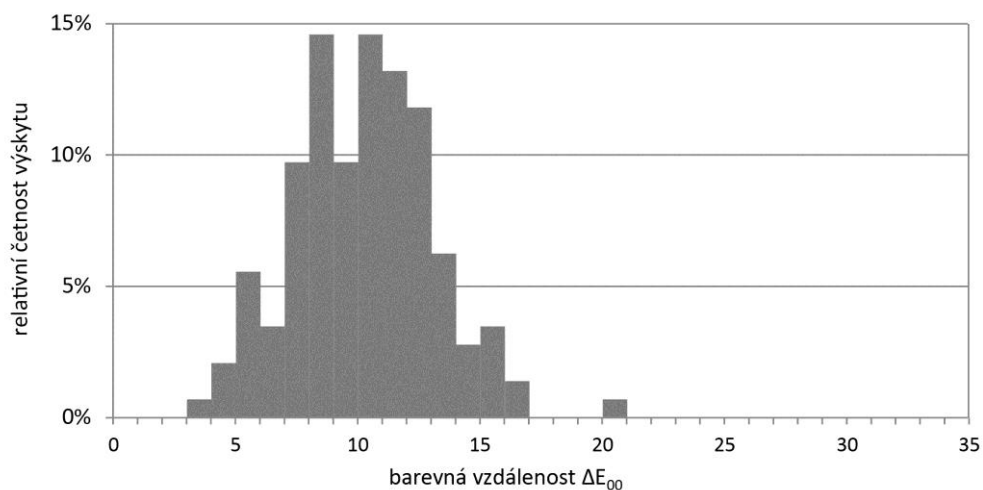
Obrázek 19. Barevné vzdálenosti pro sekvenční stupnice ColorBrewer 2.0 s 9 intervaly (A-I).



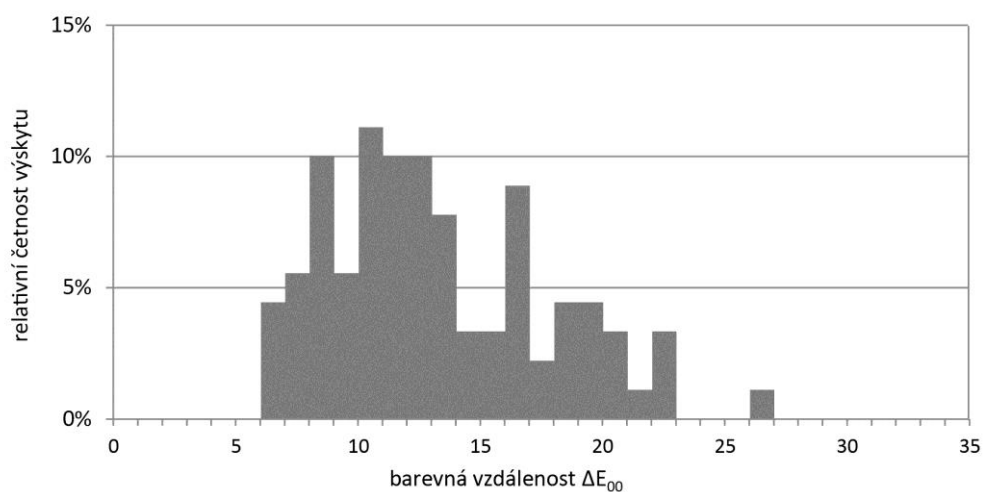
Obrázek 20. Barevné vzdálenosti pro sekvenční stupnice ColorBrewer 2.0 se 6 intervaly (A–F).



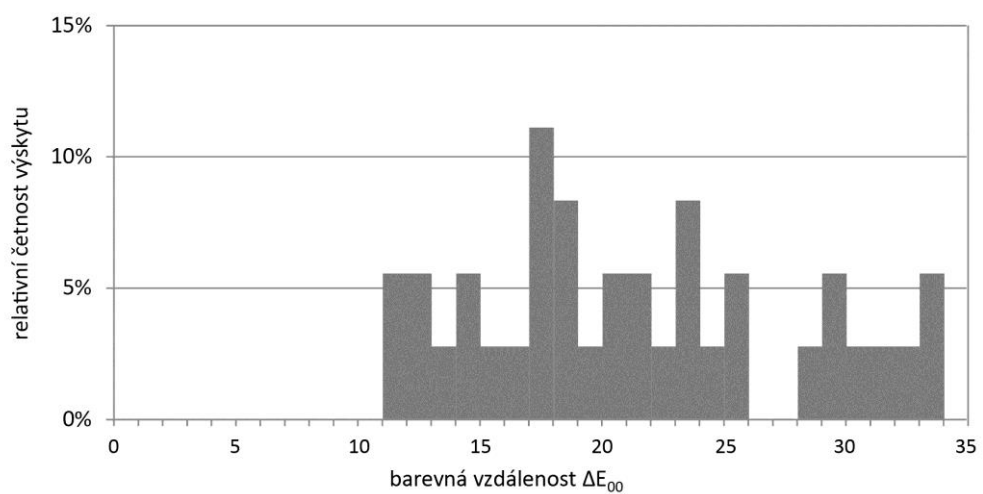
Obrázek 21. Barevné vzdálenosti pro sekvenční stupnice ColorBrewer 2.0 se 3 intervaly (A–C).



Obrázek 22. Relativní četnost výskytu hodnot barevné vzdálenosti ΔE_{00} u 18 zkoumaných sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0 s 9 intervaly.



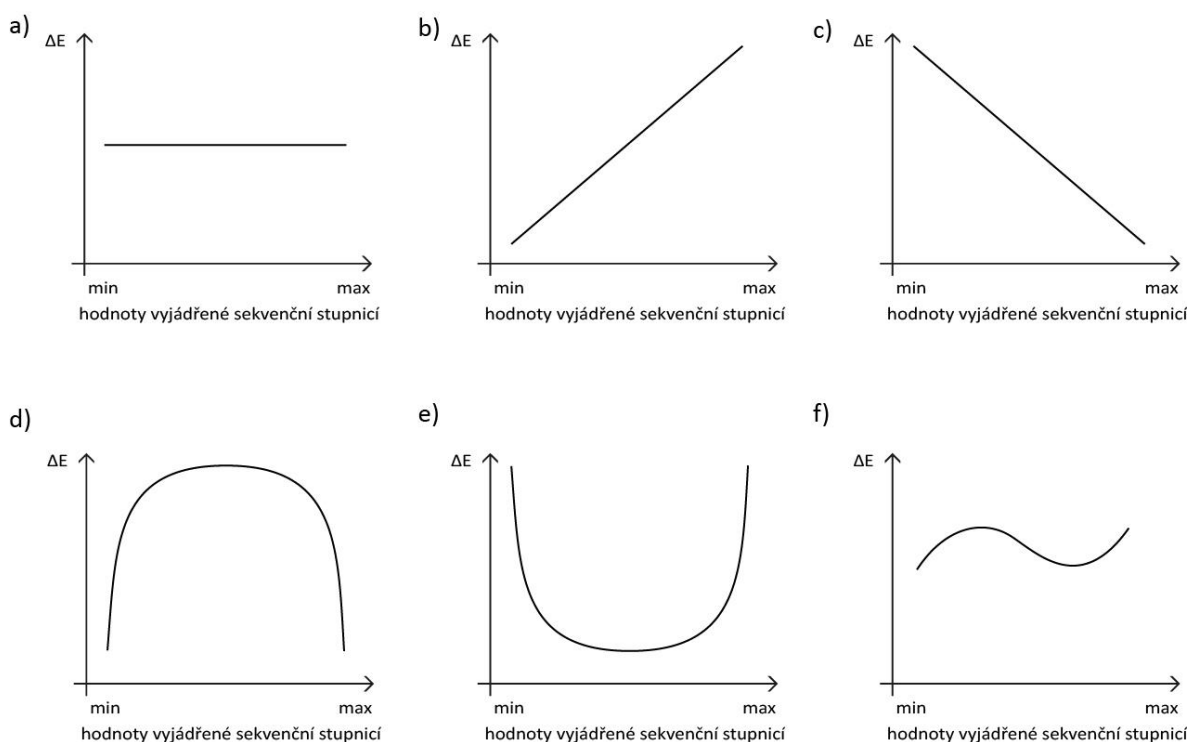
Obrázek 23. Relativní četnost výskytu hodnot barevné vzdálenosti ΔE_{00} u 18 zkoumaných sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0 se 6 intervaly.



Obrázek 24. Relativní četnost výskytu hodnot barevné vzdálenosti ΔE_{00} u 18 zkoumaných sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0 se 3 intervaly.

Motivováno hodnocením sekvenčních stupnic ColorBrewer 2.0 bylo vymezeno šest teoretických variant rozložení barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenční stupnice (obr. 25):

- uniformní (hodnota barevné vzdálenosti je mezi sousedícími intervaly stejná),
- rostoucí (barevná vzdálenost je nejnižší mezi nejsvětlejšími a nejvyšší mezi nejtmašími intervaly),
- klesající (barevná vzdálenost je nevyšší mezi nejsvětlejšími a nejnižší mezi nejtmašími intervaly),
- konkávní (barevná vzdálenost se zvyšuje směrem k prostředním intervalům),
- konvexní (barevná vzdálenost se snižuje směrem k prostředním intervalům),
- proměnlivá (barevná vzdálenost má náhodný průběh).



Obrázek 25. Teoretické varianty aplikace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic.

Vzhledem k absenci uživatelského testování zmíněných stupnic není možné stanovit, která varianta vývoje barevné vzdálenosti v rámci sekvenční stupnice je optimální. V rámci druhého dílčího cíle bude testována především první a čtvrtá varianta.

5 DC2-EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ VLIVU BAREVNÉ VZDÁLENOSTI

Vzhledem k velkému množství různých ovlivňujících faktorů je studium vnímání barev velice komplexní problematikou. Podle studií molekulární biologie dokáže i minimální genetický rozdíl dvou lidí způsobit znatelný rozdíl jejich vnímání barev. Existuje tedy nepočítané množství způsobů, jak vidět jedinou barvu (Dent et al. 2009). Fyziologicky je dáno, že lidé jsou citlivější na určité oblasti barevného spektra více než na jiné. Při denním osvětlení je největší citlivost v oblasti zeleného světla o vlnové délce zhruba 555 nm (Gegenfurtner a Sharpe, 2001). Existují i názory, že barvocit je uzpůsoben prostředím, ve kterém člověk žije; obyvatelé nemají takovou citlivost na rozlišování odstínů, které se v jejich přirozeném prostředí vyskytují (Berlin, 1999).

Řada lidí trpí různými, více či méně vzácnými poruchami barvocitu, které jsou způsobeny absencí určitého typu světločivých buněk na sítnici. Tzv. barvoslepostí je postižena nezanedbatelná část populace. Odhaduje se, že jednou z možných poruch trpí 4 % populace a z toho 95 % jsou muži (Murray et al., 2012; Olson a Brewer, 1997).

Podle některých studií má na rozlišování barev vliv i paměť a slovní zásoba. Pojmenovatelné barvy si uživatel lépe zapamatuje (Brown et al., 2011; Witthoft et al., 2003), a tedy je dokáže lépe identifikovat v mapě (Brewer, 1996b). Zapamatovat si několik odstínů jednoho barevného tónu je prakticky nemožné (Albers, 2013).

Existují i vnější faktory ovlivňující počitek, například druh osvětlení – jinak budou vypadat barvy materiálů při denním, nebo pod umělým osvětlením. Velký význam má vzájemné uspořádání barev; například světlejší oblast na mapě sousedící s tmavou oblastí se může jevit jako mnohem světlejší než ve skutečnosti je (Brewer, 1996b). Tento jev je známý jako *simultánní kontrast*. Vliv simultánního kontrastu je tím větší, čím větší je barevná vzdálenost mezi dvěma sousedícími barvami - buď v rámci osy zelená-červená, žlutá-modrá, nebo osy určující jas (Brewer, 1992).

Na rozlišování barev má vliv i jejich vzájemná vzdálenost v rámci zorného pole pozorovatele. Smysluplný vjem je možné pořídit pouze určitou částí zorného pole, jejíž velikost záleží na typu úkolu (Holmqvist et al., 2011). Rozlišení barev dvou objektů prostřednictvím periferního vidění je možné, i když jsou vzdáleny přes velkou část zorného pole (60° horizontálně a 30° vertikálně) (Ishiguro a Rekimoto, 2011). Mimo výše zmíněný simultánní kontrast je schopnost rozlišení barevnosti znaků ovlivněna i jejich rozložením v rámci kontextu ostatních znaků (Phillips a Noyes, 1982; Whitney a Levi, 2011).

Žádný matematický model by nedokázal pracovat se všemi faktory ovlivňující vnímání barev jedince. Komplexně individualistický přístup studia percepce barev by v řadě aplikací, včetně kartografie, byl pravděpodobně zbytečný. V disertační práci jsou zkoumány jen vybrané faktory ovlivňující percepci barev, přičemž vliv těch ostatních je eliminován.

Druhý dílčí cíl disertační práce je zaměřen na empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo

kvantita je reprezentovaná barvou. Na barevnou vzdálenost je zde nahlíženo z kolorimetrického hlediska, tedy způsobem, který zkoumá a popisuje barvy ve vztahu k fyziologii lidského vnímání.

Ve všech experimentech disertačního výzkumu je aplikovaná metoda výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000, která je definovaná prostřednictvím empiricky stanovených modelů vnímání barev a její principy byly uvedeny v podkapitole 3.4.

Barva představuje jeden z klíčových vyjadřovacích prostředků kartografie (Voženílek a Kaňok 2011) patří mezi velice dominantní vizuální stimuly a je důležitým elementem vzhledu map. Tufte (2008) uvádí 4 způsoby použití barvy v mapách: barva pro popis (písmo), vyjádření kvantity jevů, vyjádření kvality jevů a barva jako estetický prostředek. První tři typy uplatnění barev na mapách jsou předmětem následujících experimentů disertačního výzkumu zaměřených na výzkum čitelnosti popisu a hodnocení sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

Celkem bylo provedeno a vyhodnoceno šest následujících experimentů:

1. *Labels*: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na čitelnost popisu v mapách
2. *Schemes*: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost
3. *Euclid*: Vliv vzdálenost znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení
4. *Order*: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy
5. *Optimalization*: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic
6. *Hue*: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

Použité metody a postupy jsou ve velké míře společné pro všech šest uvedených studií, proto je jejich souhrn uveden v kapitole 2. *Metody a postup zpracování*.

5.1 Labels: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na čitelnost popisu v mapách

Cílem experimentu *Labels* bylo analyzovat vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na celkovou čitelnost popisu na mapě, tedy na schopnost za daných podmínek přečíst zobrazená slova. Pro dobrou čitelnost popisu jsou intuitivně zásadní dvě Bertinovy (Bertin, 1983) vizuální proměnné (v angl. *Visual variables*) - barva a velikost. Důležitost těchto dvou vizuálních proměnných (nejen pro popis) empiricky potvrdil i současný výzkum (např. Garlandini a Fabrikant, 2009; Gartner a Hiller, 2008; Chesneau, 2007).

V souvislosti s popisem na mapách se odborná literatura zaměřuje zejména na hledání algoritmu pro jeho vhodné umístění zabráňující překryvu jednotlivých slov mezi sebou navzájem, ale i mapových znaků (Bělka a Voženílek, 2013; Van Dijk, 2001; Doddi et al., 1997; Ooms et al., 2012; Polishchuk a Vihavainen, 2010; Wagner a Wolf, 1995). Optimalizace umístění popisu map by mohla být částečně řízena i na základě rozmístění barev na mapě a barevné vzdálenost mezi popisem a podkladem.

Jednou z prvních studií o čitelnosti popisu na mapách ve vztahu k barvám prezentoval Robinson (1952). Ten studoval vybraný soubor různě barevných popisů na různě barevném podkladu. Jako nejlepší barevnou kombinaci vyhodnotil černé písmo na bílém podkladu, zatímco nejhorší se ukázaly kombinace černé písmo na fialovém podkladu, červené na zeleném a oranžové na bílém. Robinson bohužel neuvedl přesný popis experimentálního nastavení a testované barvy jsou definovány pouze prostřednictvím jejich názvů bez exaktního číselného vyjádření vůči konkrétnímu barevnému prostoru. Proto může být jeho postup těžko zopakován.

Vliv velikosti popisu na efektivitu vizuálního vyhledávání na mapách studovala Bartz (Bartz, 1970b). Svým experimentem nepotvrdila signifikantní vliv měnící se velikosti fontu na rychlost vyhledání popisu.

Podle Deeb a kol. (Deeb et al., 2011, 2012, 2014) čitelnost popisu záleží na dvou faktorech: estetice a efektivitě. Jejich první dvě studie (2011 a 2012) jsou zaměřeny na identifikaci preferovaných vizuálních proměnných pro popis na mapách. Zjistili, že preference dotazovaných skupin respondentů se mění nesystematicky a nelze stanovit, které vizuální proměnné přispějí k lepší čitelnosti. V další studii (2014) se zaměřili na testování barevné komplementarity mezi popisem a podkladem a přitom studovali vliv barevné vzdálenosti a rozdílnosti jasu (v angl. *luminance difference*). Korelaci barevné vzdálenosti s časem potřebným pro vyhledání odpovědi se nepodařilo potvrdit.

5.1.1 Metody

Cílem experimentu *Labels* bylo zjistit vliv *barevné vzdálenosti* mezi popisem na mapě a podkladem, *velikosti písma* a *kombinace obou proměnných* na schopnost uživatelů vyhledat na mapě určený popis. Bylo předpokládáno, že rostoucí barevná vzdálenost a zvětšující se velikost písma má pozitivní vliv na celkovou čitelnost mapy. Uživatelé mapy budou mít tedy méně potíží najít a přečíst určený popis.

Pro ověření předpokladu byl sledován vliv dvou nezávislých proměnných: *barevné vzdálenosti* a *velikosti písma* na průběh pěti závislých proměnných: *přesnosti* (správnosti) odpovědi, *času* do

odpovědi, *frekvence fixací, délky fixací, rychlosti scanpath* v rámci celého stimulu i v určených oblastech zájmu (AOI).

Účastníci experimentu

Experimentu se zúčastnilo 53 dobrovolníků. Pro další analýzu byly použity eye-tracking záznamy 50 účastníků. Data 3 účastníků nebyla použita, neboť výsledky kalibrace nebyly uspokojivé (prostorová přesnost byla vyšší než 1°) a zařízení zachytilo méně než 90 % záznamů (v angl. *Tracking Ratio*).

Všichni účastníci byli studenty Univerzity Palackého v Olomouci, jejich věk se pohyboval v rozmezí 20–25 let. 30 účastníků, kteří úspěšně splnili alespoň jednu zkoušku z kartografického předmětu, bylo zařazeno do skupiny ‚expert‘; zbylých 20 do skupiny ‚začátečník‘. Experimentu se účastnilo 28 mužů (z toho 18 expertů a 10 začátečníků) a 22 žen (z toho 12 expertů a 10 začátečníků). Žádný z účastníků neuvedl postižení některou z poruch barvocitu.

Design a průběh experimentu

Experiment proběhl v kontrolovaných podmínkách eye-tracking laboratoře Katedry geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž technické parametry jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.

Společným předmětem všech experimentálních úkolů bylo najít určenou administrativní jednotku podle jména a označit ji na stimulu kliknutím myši. Aby bylo zamezeno efektu geografických znalostí účastníků, na stimulech byly znázorněny administrativní jednotky vybraných států USA. Pořadí stimulů bylo náhodné a unikátní pro každého účastníka, aby se rozptýlil případný efekt učení. Experiment byl sestaven z 15 náhodně uspořádaných sad (v angl. *trials*). Každá sada obsahovala stimulus se zadáním otázky, fixační křížek a samotný experimentální stimulus. Aby byla zajištěna únosná délka experimentu, byl zaveden časový limit 30 s pro nalezení odpovědi. Čas byl nastaven na základě pilotní studie tak, aby účastníci byli schopni úkol vyřešit bez pocitu časové tísně.

Stimuly

Experimentálními stimuly byly statické mapy administrativních jednotek zjednodušené ve smyslu tematického i grafického obsahu. Stimuly obsahují hranice a názvy administrativních jednotek pěti vybraných států USA (Arizona, Nevada, Maine, New Jersey a Wyoming). Přestože se počet popisů a jejich rozmístění se na stimulech mění (Arizona má 15 jednotek, Nevada 17, Maine 18, New Jersey 21 a Wyoming 24), uplatněný typ designu experimentu (within-subject) zajišťuje, že tyto variace neovlivní výsledky dané velikostí písma. Z hlediska barevné vzdálenosti účastníci pracovali se subsetem každé podmínky, avšak vzniklé variace podmínek jsou velice subtilní a proto nebyl očekáván žádný nežádoucí efekt.

Geografické měřítko map států bylo změněno, aby velikost jednotek byla na monitoru srovnatelná.

Každý stimulus je charakterizován určitou hodnotou barevné vzdálenosti mezi popisem a podkladem a velikostí písma. Testováno bylo 5 úrovní barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100

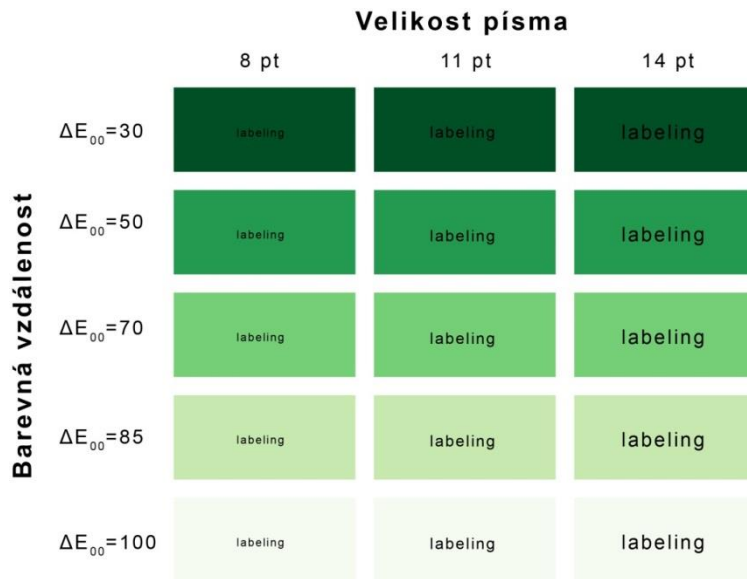
a 3 úrovně velikosti písma 8, 11 a 14 pt (odpovídající skutečně tomu, co respondenti viděli na laboratorním monitoru).

Úrovně velikosti písma byly vybrány z důvodu jejich běžného používání na mapách i v atlasech (Robinson, 1952). Výběr úrovní barevné vzdálenosti nemohl být motivován předchozím výzkumem, protože v době přípravy experimentu (prosinec 2011) žádný takový neexistoval. Byl tedy zvolen průzkumný přístup a vybrané úrovně barevné vzdálenosti zastupují celé spektrum možností od velice subtilních po zcela zjevné. Popis byl ve všech případech proveden čistě černým (RGB (0,0,0)) bezpatkovým písmem (Arial), protože se považuje za dobře čitelný font usnadňující vizuální hledání názvů míst na mapách (Slocum et al., 2008). Podkladovou barvou jsou různé odstíny zelené. Tento výběr nemá žádné exaktní opodstatnění. Teoreticky by volba podkladové barvy neměla změnit výsledky experimentu, pokud by byla zachována stejná barevná vzdálenost. Pro hlubší poznání této problematiky by bylo třeba provést další studie, ale vzhledem k časovému omezení to nebylo v rámci disertačního výzkumu možné.

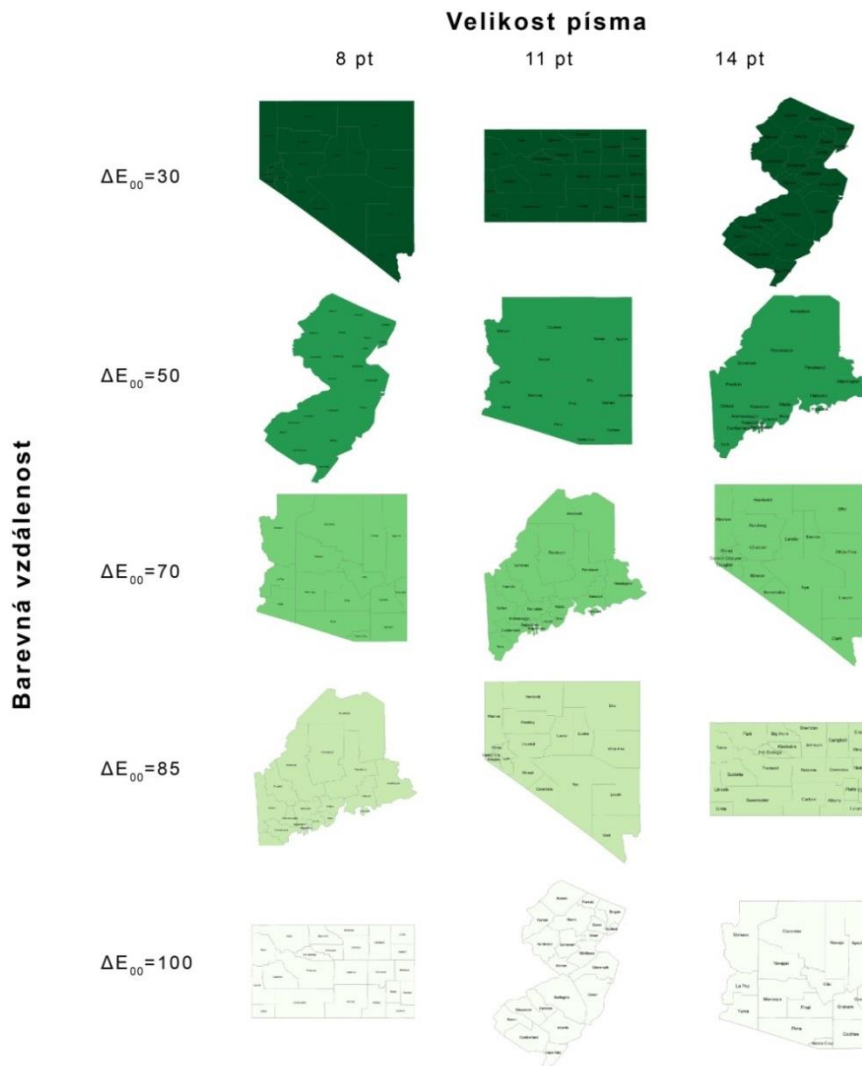
Barevná vzdálenost byla vypočítána metodou CIEDE2000. Specifikace barevnosti podkladu společně s odpovídající barevnou vzdáleností (vypočítanou třemi různými metodami) vůči černému popisu je uvedena v tabulce 6. Přibližná barevnost a podoba stimulů je prezentována na obrázku 26, resp. 27. Ukázka stimulů je umístěna do přílohy 2 a 8.

Tabulka 6. Specifikace barevnosti podkladu v souřadnicích sRGB a CIELAB s odpovídající barevnou vzdáleností vůči čistě černému popisu prostřednictvím různých metod (zleva CIEDE2000, CIE76 a velikosti vektoru v RGB krychli).

Barevná vzdálenost			Specifikace podkladu v sRGB			Specifikace podkladu v CIELAB		
ΔE_{00}	ΔE_{ab}	ΔE_{RGB}	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
30	48	20	0	80	37	29,08	-32,70	19,02
50	80	40	36	154	80	56,15	-48,43	29,37
70	95	60	117	207	119	75,91	-44,52	34,88
85	94	80	199	232	175	88,42	-20,48	23,49
99	99	100	249	255	245	99,32	-3,30	3,12



Obrázek 26. Přibližný náhled barevnosti všech testovaných podmínek.



Obrázek 27. Vzhled experimentálních stimulů.

5.1.2 Výsledky

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jak změna velikosti písma a barevné vzdálenosti ovlivňuje čitelnost popisu na mapách a zda je možné stanovit konkrétní hranici rozlišitelnosti barev prostřednictvím barevné vzdálenosti pro potřeby kartografie.

Všichni účastníci experimentu dokázali najít správnou odpověď během zadaného limitu 30 s, proto nebyla správnost odpovědí dále analyzována.

Hlavními hypotézami studie bylo:

(H1) Větší velikost popisu způsobuje zkrácení času řešení úkolu.

(H2) Větší barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem způsobuje zkrácení času řešení úkolu.

(H3) Větší velikost popisu způsobuje pokles délky fixací, snížení frekvence fixací a zkrácení scanpath.

(H4) Větší barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem způsobuje pokles délky fixací, snížení frekvence fixací a zkrácení scanpath.

Velikost písma a barevná vzdálenost

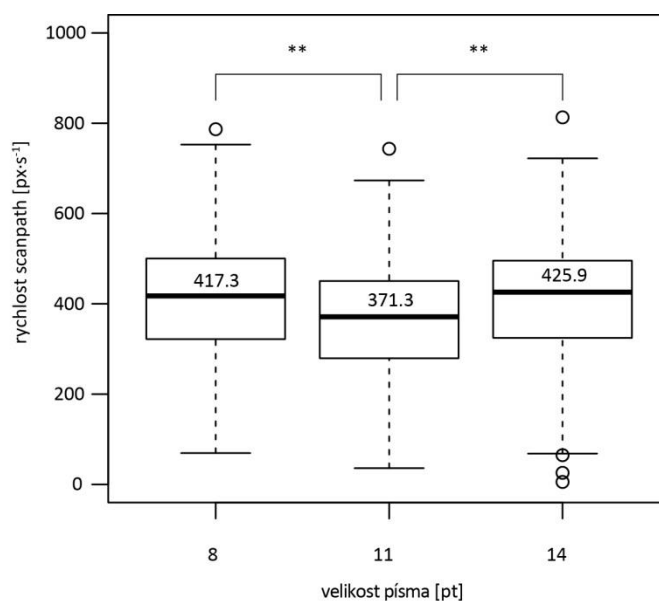
Naměřené metriky byly nejprve hodnoceny srovnáním agregovaných výsledků podle *velikosti písma* bez ohledu na barevnou vzdálenost. Prostřednictvím Kruskal-Wallisova testu bylo provedeno srovnání času do odpovědi a eye-tracking metrik naměřených u tří skupin stimulů s velikostí popisu 8, 11 a 14 pt.

Statisticky signifikantní odlišnosti mezi třemi skupinami podle velikosti písma byly potvrzeny pouze pro metriku *rychlost scanpath* ($H = 17,56$; $p = 0,00$). Ostatní metriky neprojevily žádné odlišnosti (tab. 7). Pomocí post-hoc Kruskal-Wallisova testu bylo zjištěno, že stimuly s velikostí písma 11 pt způsobily signifikantně nižší rychlost scanpath ($Mdn = 371,3 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$) oproti oběma alternativám (obr. 28). Rozdíl mezi velikostí 8 pt ($Mdn = 417,3 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$) a 14 pt ($Mdn = 425,9 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$) nebyl signifikantní.

Výsledky ukazují, že testované velikosti písem nemají zásadní vliv na efektivitu vizuálního vyhledávání (a tedy čitelnost mapy), což potvrzuje závěry Bartz (1970), ale vyvrací stanovenou hypotézu H1 a H3. Přesto však bylo zjištěno, že velikost 11 pt napomáhá k vyšší efektivitě vyhledávání (více viděných pixelů za sekundu oproti variantám).

Tabulka 7. Porovnání výsledků na základě velikosti písma, barevné vzdálenosti a obou proměnných navzájem. Výsledky Kruskal-Wallisova testu.

metrika	df	Frekvence fixací		Průměrná délka fixací		Rychlost scanpath		Čas do odpovědi	
		H	p	H	p	H	p	H	p
velikost písma	2	4,81	0,09	2,38	0,30	17,56	0,00	5,05	0,07
barevná vzdálenost	4	0,00	0,94	2,21	0,69	4,55	0,33	17,05	0,00
barevná vzdálenost ~ velikost písma 8	4	4,02	0,40	3,17	0,52	8,25	0,08	17,70	0,00
barevná vzdálenost ~ velikost písma 11	4	2,17	0,70	3,96	0,41	12,51	0,01	24,64	0,00
barevná vzdálenost ~ velikost písma 14	4	4,80	0,30	2,74	0,60	23,25	0,00	12,11	0,01



Obrázek 28. Rychlosti scanpath pozorované u stimulů s velikostí písma 8, 11 a 14 pt. Signifikantně nižší hodnoty byly zjištěny u velikosti 11 pt. Hodnoty uvnitř boxplotů představují mediány.⁶

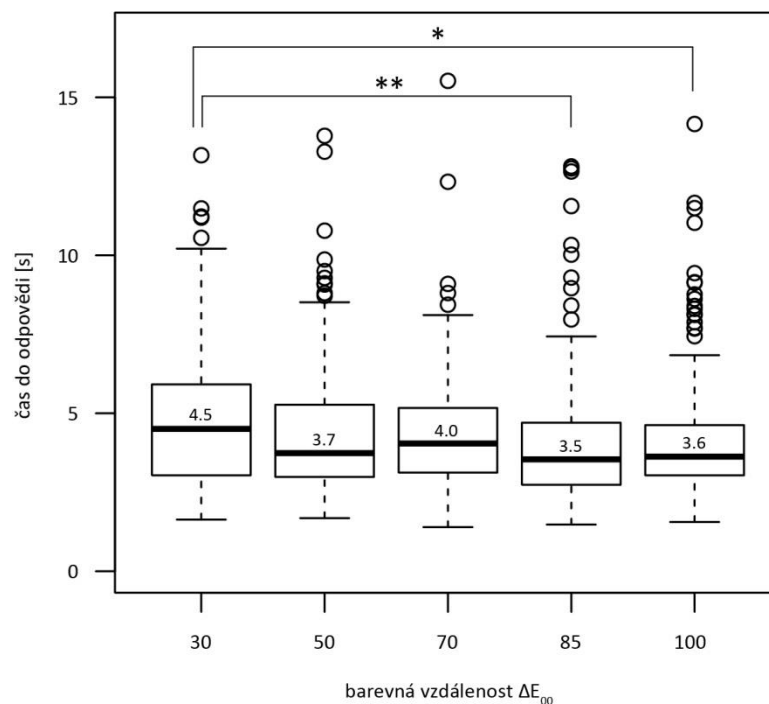
Dále byl testován vliv barevné vzdálenosti mezi popisem a podkladem bez ohledu na velikost písma. Srovnání monitorovaných metrik pěti skupin stimulů podle barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100 bylo znovu provedeno pomocí Kruskal-Wallisova testu.

Signifikantní výsledky byly zjištěny pouze u času do odpovědi ($H = 17,05$; $df = 4$; $p = 0,00$; tab. 7). Post-hoc testem byla identifikována rozdílnost mezi nejmenší barevnou vzdáleností ($\Delta E_{00} = 30$, $Mdn = 4,5$ s) a dvěma největšími barevnými vzdálenostmi ($\Delta E_{00} = 85$ $Mdn = 3,5$ s a $\Delta E_{00} = 100$

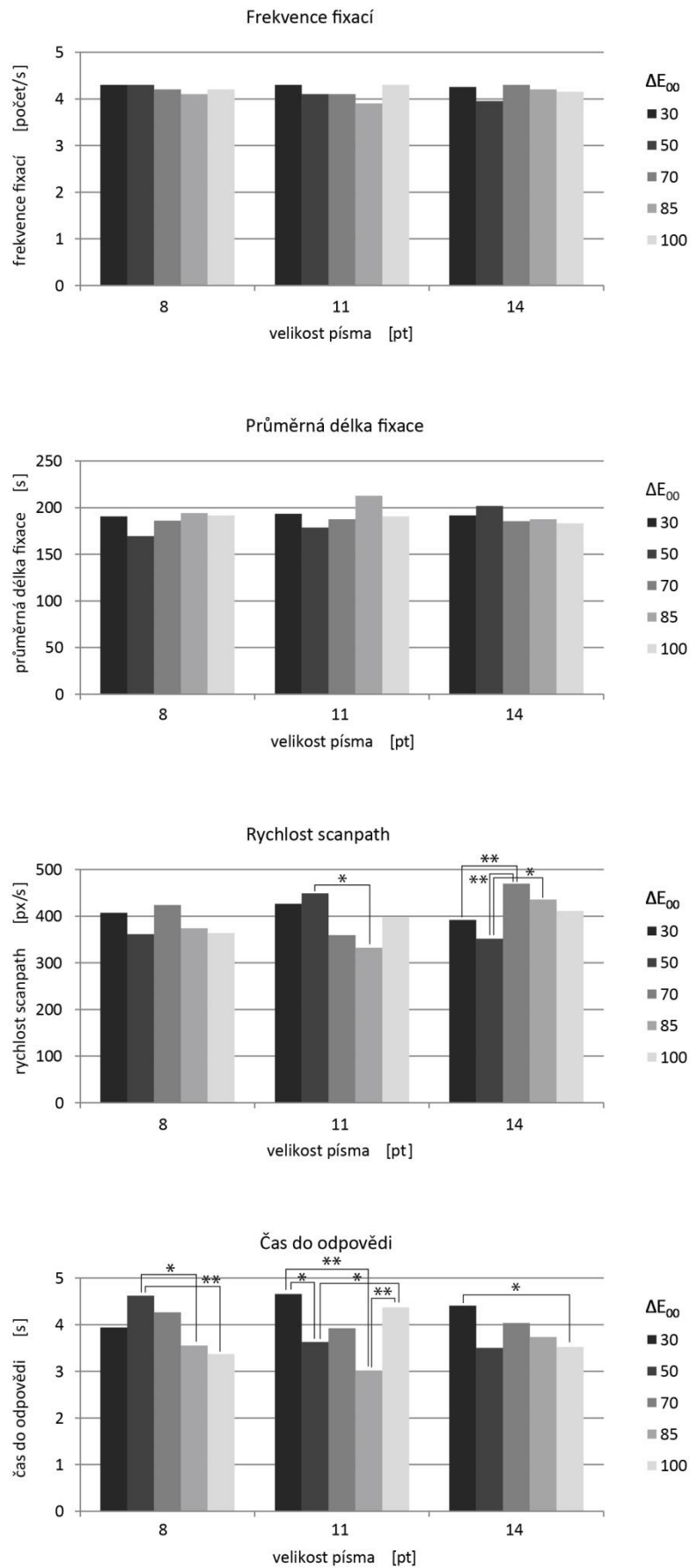
⁶ v celém DC2 jsou ve vybraných grafech signifikantní výsledky na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ značeny jednou hvězdičkou (*) a $\alpha = 0,01$ dvěma hvězdičkami (**).

$Mdn = 3,6$ s). Signifikantní rozdíl mezi ostatními hodnotami barevné vzdálenosti nebyla prokázána (obr. 29). Těmito výsledky byla hypotéza H2 potvrzena jen částečně a hypotéza H4 nebyla potvrzena vůbec.

Posledním krokem v hodnocení základních metrik byl zkoumán vliv barevné vzdálenosti v interakci se všemi testovanými velikostmi písma. Ve všech třech případech (8, 11 a 14 pt) se statisticky signifikantní odlišnosti projevily u metriky čas do odpovědi (tab. 7). U největšího písma (14 pt) byly zjištěny odlišnosti rychlosti scanpath. Konkrétní signifikantní odlišnosti odhalené post-hoc Kruskal-Wallisovým testem jsou uvedeny na obrázku 30. Ostatní metriky vliv měnící se barevné vzdálenosti a velikosti písma neprojevily.



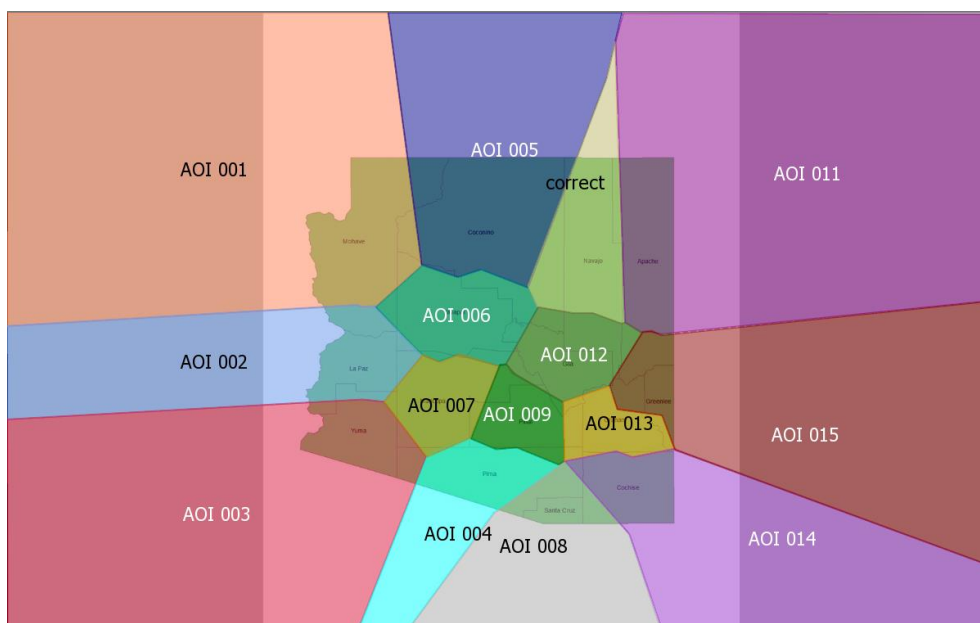
Obrázek 29. Čas do odpovědi pozorovaný u stimulů s pěti úrovněmi barevné vzdálenosti. Výsledky částečně potvrzují původní hypotézu H2: vyšší barevná vzdálenost usnadňuje čitelnost popisu. Hodnoty uvnitř boxplotů představují mediány.



Obrázek 30. Mediány sledovaných metrik podle velikosti písma (8, 11 a 14 pt) a barevné vzdálenosti ($\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100).

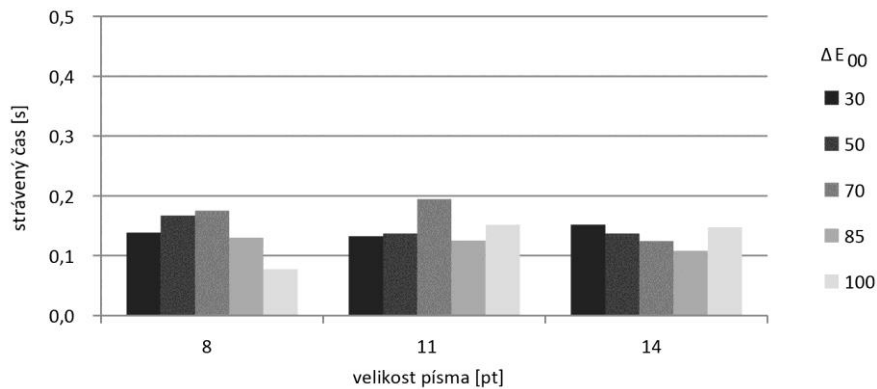
V další části výzkumu byla provedena hlubší analýza eye-tracking dat v definovaných oblastech zájmu (v angl. *Areas of Interest*, AOI). Tato problematika byla pojata čistě explorativně, tedy nebyla stanovena žádná hypotéza o projevu eye-tracking dat v rámci AOI.

AOI byly zkonstruovány pro každý popis na stimulu tak, aby všechny body bližší danému popisu náležely do příslušné AOI (obr. 31). Princip konstrukce AOI je stejný, jako pro Voronoi diagramy. Tento postup byl aplikován s ohledem na prostorovou přesnost naměřených eye-tracking dat, která nemůže garantovat, že bod pohledu padne přímo na písmena popisu, i když je právě čten. Vzhledem k tomu, že na stimulu nejsou kromě popisu žádné další prvky, které by mohly upoutat pozornost respondentů, lze tuto metodu konstrukce AOI považovat za validní a jejich analýza může být provedena i bez korekcí podle jejich rozlohy.

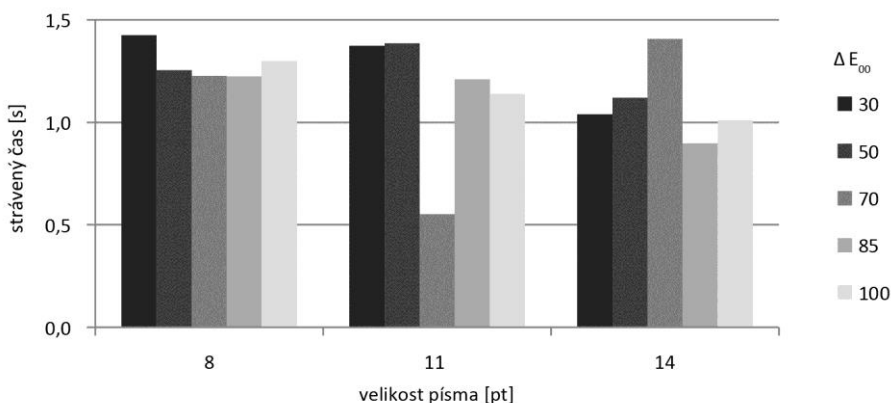


Obrázek 31. Oblasti zájmu pro vybraný stimulus experimentu ($\Delta E_{00} = 70, 8 \text{ pt}$). AOI pojmenovaná 'correct' představuje umístění správné odpovědi.

Analýzou AOI byl zjištěn značný rozdíl mezi časem stráveným v oblasti představující správnou odpověď (určený popis) a irelevantními AOI (ostatní popisy na stimulu). Všeobecným poznatkem je, že respondenti potřebovali v průměru velice krátký čas ($M = 134,1 \text{ s}$) k tomu, aby identifikovali daný popis za nesprávný (obr. 32). Ovšem přečtení a označení správného popisu trvalo mnohem déle ($M = 1286,2 \text{ s}$; obr. 33).



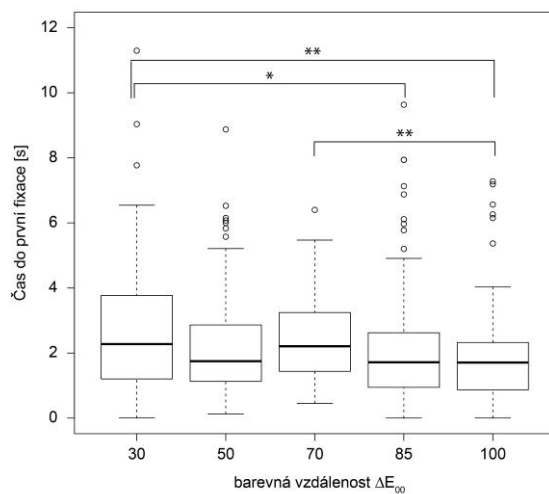
Obrázek 32. Průměrný čas strávený v irelevantních AOI, které neobsahují správnou odpověď.



Obrázek 33. Průměrný čas strávený v AOI která, obsahuje správnou odpověď.

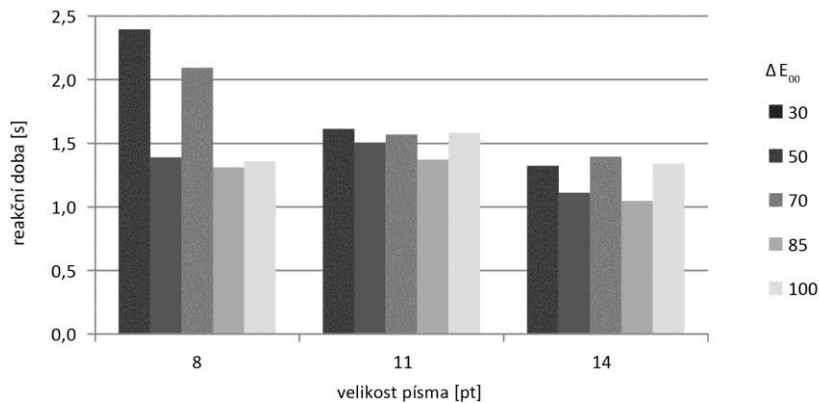
Dále zjištěno, že s rostoucí barevnou vzdáleností klesá čas do prvního fixace na oblast se správnou odpovědí (obr. 34). Kruskal-Wallisův test odhalil signifikantní rozdílnost ($H = 25,84$; $p = 0,00$) mezi nejmenší a dvěma nejvyššími hodnotami barevné vzdálenosti (stejně jako u času do odpovědi) a zároveň mezi $\Delta E_{00} = 70$ a 100 .

Tento poznatek koresponduje s výsledky analýzy času do odpovědi a společně tedy podporují hypotézu H2, že vyšší barevná vzdálenost umožňuje lepší čitelnost popisu.



Obrázek 34. Čas do první fixace na AOI se správnou odpovědí podle barevné vzdálenosti.

Výzkum neprokázal, zda první fixace na oblasti správné odpovědi vede nutně k jejímu okamžitému rozpoznání a označení, či zda uživatelé potřebují čas k rozmyšlení. Zhodnocením času mezi první fixací a označením (kliknutím myši) správné odpovědi, bylo zjištěno, že průměrná reakční doba je $M = 1,49$ s. V případě nejmenší barevné vzdálenosti a nejmenšího písma ($\Delta E_{00} = 30$ a 8 pt) je však tento čas mnohem vyšší ($M = 2,40$ s), což indikuje větší obtížnost přečtení popisu s těmito parametry (obr. 35).



Obrázek 35. Průměrná reakční doba účastníků experimentu určená rozdílem mezi časem první fixace na správnou odpověď a časem jejího označení.

5.1.3 Závěr

Všechny parametry testovaných proměnných (barevná vzdálenost $\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100 a velikosti písma 8, 11 a 14 pt) se ukázaly být pro potřeby vyřešení experimentálního úkolu vyhovující. Správnost odpovědí, která patří mezi klíčové ukazatele použitelnosti, byla 100%. Čas strávený řešením úlohy však ukázal, že čím je barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem nižší, tím déle trvá jeho identifikace. Ze tří testovaných velikostí písma se jako nejvíce efektivní ukázala prostřední velikost (11 pt).

Předložená pozorování sice neodpověděla na původní otázku, tj. jaká je hodnota minimální barevné vzdálenosti pro metody kartografického vyjadřování (v tomto případě pro písmo na mapách), přesto dávají základ pro stanovení a testování nových hypotéz.

5.2 Schemes: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost

Cílem experimentu *Schemes* bylo systematicky analyzovat vliv barevné vzdálenosti na použitelnost sekvenčních a kvalitativních barevných schémat a zároveň zjistit minimální efektivní hodnotu barevné vzdálenosti pro potřeby kartografické vizualizace. Základní hypotézou bylo, že rostoucí barevná vzdálenost mezi intervaly/kategoriemi barevných schémat vede k lepší čitelnosti mapy.

Optimální hodnota barevné vzdálenosti nebyla doposud empiricky stanovena. Maximální uplatnitelná hodnota barevné vzdálenosti mezi jednotlivými intervaly a třídami barevných schémat je ovlivněna jejich počtem: s rostoucím počtem intervalů sekvenčních a kategorií kvalitativních schémat se se musí snižovat jejich vzájemná barevná vzdálenost. Čím více je v mapě použito barev, tím hůře se navzájem odlišují.

Studium vlivu počtu odstínů, především u sekvenčních schémat, bylo tématem řady studií. Mersey (1990) zjistil, že při počtu 9 kategorií značně klesá efektivita přenosu informace. Dent et al. (2009) uvádějí, že rozumný počet rozlišitelných barev na mapě je 12. Jiní autoři doporučují počet tříd mezi 5 a 7 (Miller, 1956; Evans, 1977; Mersey, 1984, 1990; Cromley, 1995 in Al-Ghamdi, 2014).

Vzhledem k náročnosti řešení této problematiky a velkému množství různých variant (hodnoty barevné vzdálenosti, počet tříd, barevnost schémat) bylo nutné v tomto experimentu zúžit studovanou oblast a hodnoty barevné vzdálenosti testovat pouze na schématech se šesti intervaly/kategoriemi.

5.2.1 Metody

Experiment byl proveden ve dvou navazujících fázích. První fáze byla provedena *on-line dotazníkem* (dále bude v textu označovaná jako *WS* z angl. *web survey*), druhá fáze proběhla v kontrolovaných podmínkách *eye-tracking* laboratoře KGI UPOL (dále bude v textu označovaná jako *ET* z angl. *eye-tracking*).

Účastníci experimentu

Fáze *WS* se zúčastnilo 608 dobrovolníků, z nichž 211 (121 žen a 90 mužů) odpovědělo na všechny otázky a jejich odpovědi byly dále hodnoceny. Zastoupení věkových skupin bylo 7 % 16–19 let, 70 % 20–30 let, 15 % 31–40 let, 4 % 41–50 let, 3 % 51–60 let a 1 % nad 70 let. Kontrolovaným *ET* experimentem bylo otestováno 32 osob (19 žen a 13 mužů) ve věkových skupinách 93 % 20–30 let, 4 % 50–60 let a 2 % 61–70 let.

Struktura respondentů *WS* na základě jejich odbornosti byla 44 žen a 54 mužů expertů a 77 žen a 36 mužů začátečníků. Při *ET* experimentu byla struktura podobná: 8 žen a 9 mužů expertů a 11 žen a 4 muži začátečníci. Žádný z účastníků neuvedl postižení některou z poruch barvocitu.

Design a průběh experimentu

Účastníci obou fází experimentu (*WS* i *ET*) byli vystaveni všem testovaným podmínkám (tzv. *within-subject design*). Pořadí stimulů bylo náhodné a unikátní pro každého účastníka. Časový limit pro vyřešení úkolu nebyl stanoven.

Experiment se skládal ze dvou typů úloh:

- (a) najít na mapě dva areály označené tečkou, porovnat je a rozhodnout, zda je jejich výplň stejně barevná. Účastníci mohli vybrat jednu z odpovědí: (1) ano, označené areály jsou stejně barevné, (2) ne, označené areály nejsou stejně barevné, (3) nevím, nejsem schopen s určitostí odpovědět. Třetí typ otázky byl zařazen proto, aby respondenti nebyli v případě pochybností nuceni označit ano/ne a náhodně odpovědět správně.
- (b) najít na mapě tři areály označené tečkou a písmenem, porovnat jejich výplň a seřadit je od nejsvětější po nejtmaší (případně určit shodnou barevnost). Tato otázka byla součástí pouze eye-tracking experimentu.

WS byl vytvořen v open-source prostředí LimeSurvey (The LimeSurvey project, 2011). Účastníci byli instruováni, aby při experimentu udrželi běžné podmínky, při kterých jsou zvyklí pracovat s počítačem a zároveň aby nemanipulovali s nastavením monitoru a s osvětlením v místnosti.

ET proběhl v kontrolovaných podmínkách eye-tracking laboratoře Katedry geoinformatiky, Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž technické parametry jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.

Stimuly

Bylo hodnoceno 5 sekvenčních a 5 kvalitativních barevných schémat o šesti intervalech resp. kategoriích označených písmeny A–F (v případě sekvenčních stupnic od nejsvětějšího po nejtmaší odstín).

Nejnižší testovaná hodnota barevné vzdálenosti ($\Delta E_{00} = 2$) byla zvolena proto, aby mohlo být otestováno, zda i tak malá vzdálenost (klasifikovaná Yangem et al. (2012) jako ‚znatelná‘, viz podkapitola 3.4) může být dostatečná pro vizualizaci rozdílů mezi areálovými znaky. Naopak nejvyšší testovaná barevná vzdálenost ($\Delta E_{00} = 10$) patří mezi nejčastěji použité v sekvenčních stupnicích Color Brewer 2.0 (viz studie *ColDist*, podkapitola 4.3), proto ji lze považovat za ‚bezpečnou‘. Ostatní hodnoty ($\Delta E_{00} = 4, 6$ a 8) byly zahrnuty, aby bylo možné sledovat vliv rostoucí barevné vzdálenosti na čitelnost map.

Stanování počtu intervalů/kategorií a odstínů barevných schémat byl víceméně svévolný. Sekvenční stupnice byly sestaveny z odstínů zelené. Proto jsou výsledky svým způsobem omezené, protože nereflektují možný vliv jiných barev. Autorka ale předpokládá, že při dodržení stejných barevných vzdáleností mezi intervaly různě barevných sekvenčních stupnic, by reakce uživatelů měly zůstat stejné. Pro kvalitativní schémata bylo vybráno 6 barevných tónů s přibližně konstantní hodnotou světlosti (osa L v prostoru CIELAB) z důvodu zachování jejich stejné optické váhy.

Barvy schémat byly od sebe odlišeny jednotnou barevnou vzdáleností $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ a 10 . Specifikace všech testovaných schémat a jejich odstínů je uvedena v tabulce 8 a náhled barev na obrázku 36.

Stimuly představovaly mapy fiktivního území s areály o přibližně stejné velikosti; obsahově i geometricky značně zjednodušené z důvodu omezení vlivu nechtěných nezávislých proměnných. Každý stimulus byl obarven jedním z testovaných barevných schémat. Podle typu úlohy byly na

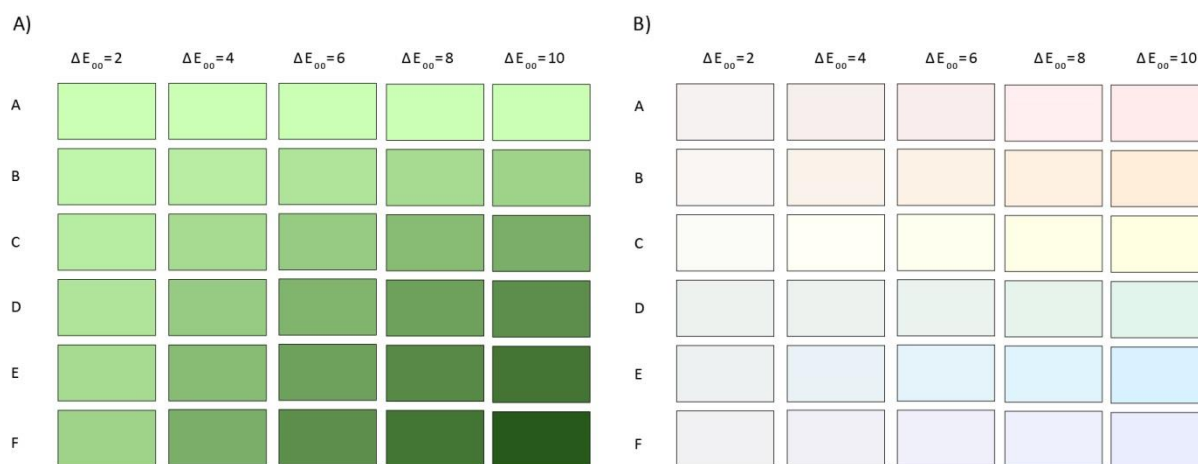
stimulech vyznačeny 2, resp. 3 areály určené k porovnání. Barevná vzdálenost mezi označenými body byla kontrolována, aby odpovídala buď určené hodnotě barevné vzdálenosti, anebo byla nulová (stejně barvy). Například stimulus obarvený schématem, jehož intervaly/kategorie jsou postupně odlišeny hodnotou $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ nebo 10, měl označeny 2, resp. 3 areály (obr. 37, příloha 3 a 8), jejichž vzájemná barevná vzdálenost byla právě $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ nebo 10. Mohly tak být označeny areály, které v rámci barevného schématu sousedí: A-B, B-C, C-D, D-E, E-F nebo A-B-C, B-C-D, C-D-E nebo D-E-F, anebo areály se stejnou barvou: A-A, B-B, C-C, ...

Prostorové rozmístění porovnávaných areálů bylo kontrolováno ve třech úrovních prostorové vzdálenosti. Ta v tomto experimentu není analyzována a pouze simuluje různé podmínky, které mohou nastat při čtení mapy. Prostorová vzdálenost je předmětem následujícího experimentu *Euclid* (podkapitola 5.3). Ostatní (neporovnávané) areály mapy byly obarveny odstíny příslušného schématu náhodně, aby byl co nejvíce zamezen (nebo rozptýlen) nežádoucí efekt simultánního kontrastu, ačkoli je zřejmé, že ten nemůže být zcela eliminován (Bláha a Štěrba, 2014).

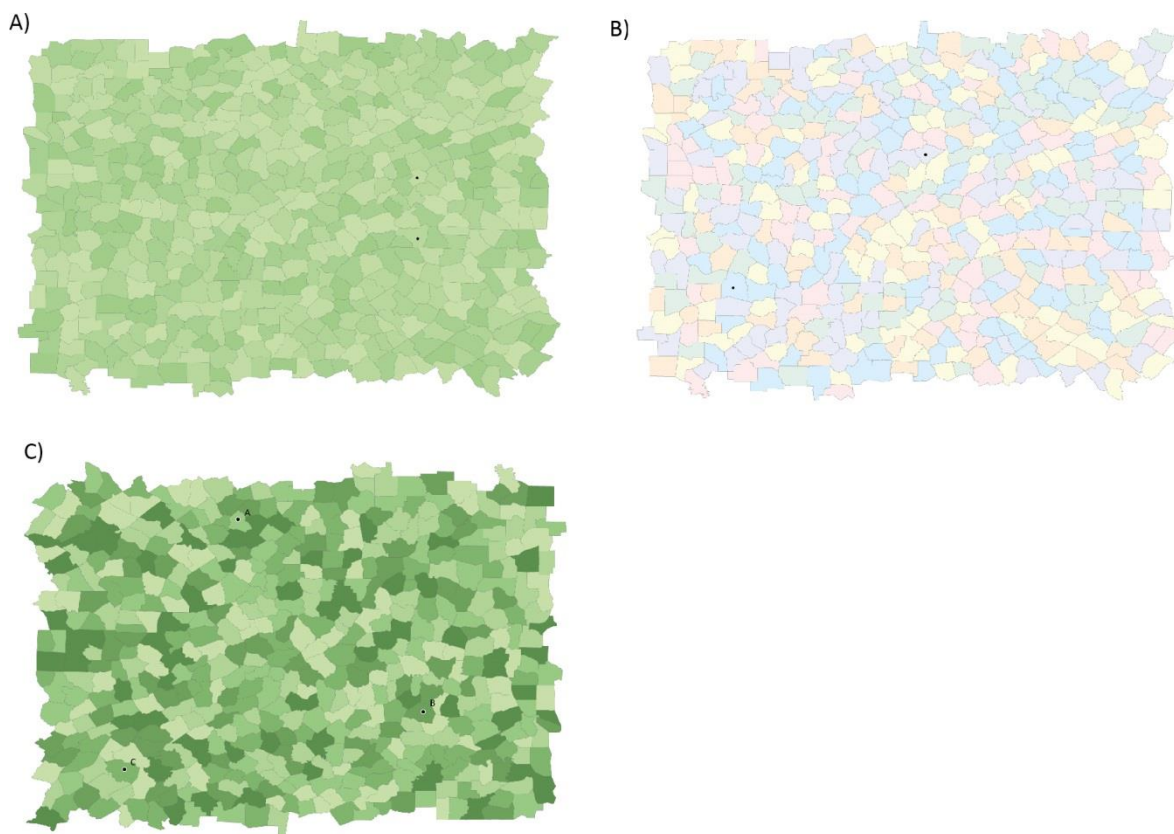
Z celkového počtu možných kombinací pro testování bylo do WS vybráno 106 a do ET 41 stimulů. Pro udržení pozornosti respondentů při WS byly po každém desátém stimulu zařazeny vtipy a optické klamy.

Tabulka 8. Specifikace barevnosti testovaných barevných schémat: sekvenční (A), kvalitativní (B).

A)								B)							
ΔE_{00}	interval	L	a	b	R	G	B	ΔE_{00}	kategorie	L	a	b	R	G	B
2	A	79,47	-30	30	159	211	138	2	A	95,00	-1	0	238	242	238
	B	82,39	-30	30	167	219	146		B	95,00	-1	2	241	241	235
	C	85,40	-30	30	175	228	154		C	99,00	0	1	252	252	247
	D	88,50	-30	30	183	237	162		D	97,00	1	0	248	246	244
	E	91,70	-30	30	192	246	171		E	95,00	1	-2	241	240	242
	F	94,80	-30	30	201	255	179		F	95,00	-1	-2	238	241	242
4	A	66,15	-30	30	123	174	104	4	A	95,00	2	0	246	239	238
	B	71,24	-30	30	136	188	117		B	96,00	1	4	249	243	234
	C	76,65	-30	30	151	203	131		C	99,70	-1	4	255	255	245
	D	82,40	-30	30	167	219	146		D	95,00	-2	1	237	242	238
	E	88,51	-30	30	184	237	162		E	95,00	-2	-4	233	242	246
	F	94,80	-30	30	201	255	179		F	95,00	1	-4	240	240	246
6	A	54,71	-30	30	93	143	76	6	A	95,00	4	1	249	238	237
	B	61,34	-30	30	110	161	92		B	96,00	2	6	252	242	229
	C	68,63	-30	30	129	181	110		C	99,50	-2	7	255	255	238
	D	76,63	-30	30	151	203	131		D	95,00	-4	1	234	243	237
	E	85,40	-30	30	175	228	154		E	95,00	-3	-6	229	243	250
	F	94,80	-30	30	201	255	179		F	95,00	2	-6	239	240	249
8	A	94,80	-30	30	201	255	179	8	A	95,50	6	1	254	239	239
	B	82,39	-30	30	167	219	146		B	95,90	2	9	255	241	225
	C	71,22	-30	30	136	188	117		C	99,30	-4	11	255	255	230
	D	61,34	-30	30	110	161	92		D	95,00	-5	1	231	244	236
	E	52,63	-30	30	88	138	71		E	95,00	-4	-8	224	244	254
	F	44,58	-30	30	67	117	52		F	95,00	2	-7	238	240	253
10	A	94,80	-30	30	201	255	179	10	A	94,70	7	1	255	235	236
	B	79,45	-30	30	159	211	138		B	94,80	3	11	255	238	217
	C	66,10	-30	30	123	174	104		C	99,20	-5	14	255	255	224
	D	54,67	-30	30	93	143	76		D	95,00	-8	2	226	245	236
	E	44,67	-30	30	68	117	52		E	94,00	-5	-10	216	242	255
	F	33,12	-30	30	39	89	26		F	94,00	3	-9	234	237	253



Obrázek 36. Náhled barevnosti testovaných barevných schémat: sekvenční (A), kvalitativní (B).



Obrázek 37. Vybrané experimentální stimuly: (A) srovnání dvou areálů, sekvenční stupnice s $\Delta E_{00} = 4$; (B) srovnání dvou areálů, kvalitativní stupnice s $\Delta E_{00} = 8$; (C) srovnání tří areálů, sekvenční stupnice s $\Delta E_{00} = 8$.

5.2.2 Výsledky

Výkon účastníků (správnost a čas) byl hodnocen především z dat získaných v průběhu WS. Získané výsledky byly ověřeny analýzou stejných proměnných zjištěných ET experimentem v kontrolovaných laboratorních podmínkách, při kterém byla otestována menší populace.

Hlavními hypotézami studie bylo:

(H1) Větší barevná vzdálenost zvyšuje výkon respondentů při získávání informací z mapy (vyšší správnost odpovědí, kratší čas řešení úkolu).

(H2) Větší barevná vzdálenost způsobuje pokles délky fixací, snížení frekvence fixací, zkrácení scanpath a snížení počtu opakovaných návštěv (přesunů) mezi porovnávanými areály.

(H3) Sekvenční a kvalitativní schémata nevykazují na stejné úrovni barevné vzdálenosti rozdílnosti v žádné ze sledovaných závislých proměnných.

Pro lepší přehlednost jsou v následujícím textu výsledky prezentovány zvlášť pro oba typy úkolů (porovnání dvou areálů a porovnání tří areálů).

Porovnání dvou areálů: Správnost odpovědí

Zjištěná správnost odpovědí byla seskupena podle úrovně barevné vzdálenosti ($\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ a 10) a typů barevných schémat (sekvenční a kvalitativní).

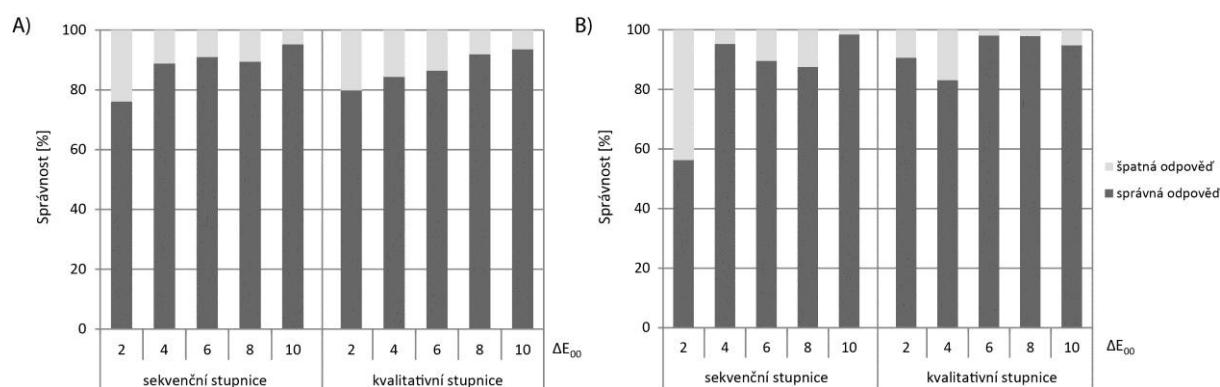
Za nesprávnou byla klasifikována odpověď, při níž respondent označil porovnávané areály jako různě barevné, přestože byly stejné, a naopak. Zároveň neurčitá odpověď („Nevím“) byla klasifikována jako nesprávná, protože indikuje neschopnost odpovědět na zadanou otázku.

Pearsonův chí-kvadrát test dobré shody odhalil při WS závislost správnosti odpovědí na barevné vzdálenosti u obou typů barevných schémat: sekvenčních ($\chi^2 = 453,27$, $df = 4$, $p = 0,00$) i kvalitativních ($\chi^2 = 254,19$, $df = 4$, $p = 0,00$). Výsledky ET tuto závislost potvrdily (sekvenční: $\chi^2 = 133,90$, $df = 4$, $p = 0,00$; kvalitativní: $\chi^2 = 32,17$, $df = 4$, $p = 0,00$).

Výsledky zjištěné při WS ukazují konzistentní pozitivní efekt rostoucí barevné vzdálenosti na správnost odpovědí (obr. 38a), jak bylo předpokládáno (H1). Zároveň u sekvenčních i kvalitativních schémat je nejvyšší správnost u $\Delta E_{00} = 10$ (98 %, resp. 96 %), zatímco nejproblematictější je $\Delta E_{00} = 2$ (78 %, resp. 80 %).

ET experiment tento pozitivní efekt v plné míře neprokázal. Nejméně účinnou barevnou vzdáleností u sekvenčních stupnic je podle předpokladu $\Delta E_{00} = 2$ (58 %), ale u kvalitativních to je $\Delta E_{00} = 4$ (82 %) (obr. 38b). Bližším zkoumáním tohoto neočekávaného výsledku bylo zjištěno, že tři stimuly z pěti pro kvalitativní $\Delta E_{00} = 4$ mělo správnost odpovědí 100 %, zatímco další dva pouze 65 % a 50 %. Nízká správnost u posledního zmíněného stimulu byla pravděpodobně způsobena simultánním kontrastem, který negativně ovlivnil srovnání dvou areálů. Tento stimulus způsobil nízkou správnost i při WS, ale vzhledem k mnohem většímu vzorku sledované populace neovlivnil výsledek tak silně, jako při ET.

Dále bylo chí-kvadrát testem zjištěno, že závislost správnosti odpovědí WS ($\chi^2 = 15,47$, $df = 4$, $p = 0,00$) i ET ($\chi^2 = 58,87$, $df = 4$, $p = 0,00$) závisí na typu barevného schématu. Při bližším zkoumání nelze však konstatovat, který z typů schémat by byl jednoznačně účinnější, protože na různých úrovních ΔE_{00} se pořadí vítěz-poražený mění. Hypotézu H3 tedy nelze potvrdit, ani vyvrátit.



Obrázek 38. Správnost odpovědí sledovaná při WS (A) a ET (B).

Porovnání dvou areálů: Čas do odpovědi

Při WS byly otázky zodpovídaný výrazně pomaleji než při ET. Čas do zjištění odpovědi na jeden úkol při WS kolísá od 2,37 do 920,88 s, zatímco při ET od 0,18 do 88,9 s. Tento rozdíl je způsoben především rozdílem v experimentální proceduře: u WS výsledný čas zahrnuje čas hledání odpovědi a samotné označení odpovědi (formulář pro odpověď byl zobrazen spolu se stimulem). Při ET

experimentu byl stimulus oddělen zvláště od formuláře na odpověď a čas tedy zahrnuje jen dobu prohlížení stimulu. Navíc extrémní časy zaznamenané u WS nemohou být zdůvodněny nízkým výkonem hledání odpovědi. Vzhledem k tomu, že on-line studie nebyla kontrolovaná, je pravděpodobné, že si respondenti mezi řešením úkolů udělali přestávku, nebo byli vyrušeni. To při ET nemohlo nastat.

Zjištěné rozdíly mezi WS a ET nejsou však důležité, protože odlišnosti mezi testovanými podmínkami byly hodnoceny relativně. Přesto, aby bylo zamezeno případnému ovlivnění výsledků díky přestávkám v průběhu WS, všechny odpovědi, které přesáhly hranici 90 s, byly z hodnocení vyřazeny (celkem 65 záznamů - ne participantů, ale individuálních úkolů). Horní hranice 90 s byla stanovena na základě maximálního času zjištěného při ET.

Mediánový čas při WS pro nalezení správné odpovědi byl $Mdn=6,79$ s ($IQR=9,34-5,33$) a špatné byl $Mdn = 8,18$ s ($IQR = 12,15-5,95$). Při ET byl mediánový čas hledání správné odpovědi $Mdn = 2,64$ s ($IQR = 4,86-1,70$) a špatné $Mdn = 3,49$ s ($IQR = 6,20-1,93$). V obou částech respondentům trvalo déle najít špatnou odpověď. Bez dalšího zkoumání toto zjištění vedlo k rozhodnutí, že čas do odpovědi i eye-tracking metriky budou hodnoceny pouze ze správných odpovědí.

Kruskal-Wallisův test prokázal, že čas potřebný k vyřešení otázky je v případě obou typů schémat závislý na barevné vzdálenosti: WS sekvenční ($H = 184,27$, $df = 4$, $p = 0,00$), WS kvalitativní ($H = 52,29$, $df = 4$, $p = 0,00$), ET sekvenční ($H = 16,44$, $df = 4$, $p = 0,00$) a ET kvalitativní ($H = 35,44$, $df = 4$, $p = 0,00$). Post-hoc Kruskal-Wallisovým testem bylo zjištěno, že při WS $\Delta E_{00} = 2$ způsobila signifikantně delší časy v porovnání s ostatními testovanými ΔE_{00} u obou typů schémat. Rozdíl v čase do odpovědi se projevil ještě u sekvenčních stupnic mezi $\Delta E_{00} = 8$ a $\Delta E_{00} = 10$. Ostatní hodnoty barevné vzdálenosti nevedly ani k pomalejším, ani rychlejším výkonům (tab. 9).

Tabulka 9. Mediány (Mdn) a mezikvartilové rozpětí (IQR) času do odpovědi při WS. Svorky vyznačují signifikantní rozdíly mezi páry.

ΔE_{00}	Sekvenční stupnice		Kvalitativní stupnice	
	Mdn	IQR	Mdn	IQR
2	7,97	11,30 – 5,93	6,90	9,68 – 5,43
4	6,80	9,47 – 5,32	6,67	9,13 – 5,29
6	6,80	9,17 – 5,38	6,48	8,79 – 5,12
8	6,61	8,98 – 5,18	6,47	8,61 – 5,13
10	6,96	9,36 – 5,56	6,58	8,80 – 5,22

Výsledky získané prostřednictvím ET podpořily zjištění z WS. U kvalitativních schémat bylo zjištěno více signifikantních výsledků (mezi $\Delta E_{00} = 4$ a 6 a $\Delta E_{00} = 4$ a 10). V tomto případě se neprojevila rozdílnost mezi $\Delta E_{00} = 2$ a 4, ale obě tyto barevné vzdálenosti se ukázaly jako časově náročnější než ostatní (tab. 10).

Hypotéza H1 nebyla na základě analýzy času do odpovědi potvrzena: zvyšování barevné vzdálenosti v tomto případě nevedlo ke konzistentnímu snižování časových nároků na vyhledání správné odpovědi. WS dokázal, že $\Delta E_{00} = 2$ způsobuje zřetelně horší výkony při hledání odpovědi u obou typů barevných schémat.

Tabulka 10. Mediány (Mdn) a mezikvartilové rozpětí (IQR) času do odpovědi při ET. Svorky vyznačují signifikantní rozdíly mezi páry.

ΔE_{00}	Sekvenční stupnice		Kvalitativní stupnice	
	Mdn	IQR	Mdn	IQR
2	4,10	8,54–2,50	3,02	5,53 –1,98
4	2,67	4,66–1,85	2,69	4,92 –1,59
6	2,81	5,96–1,74	1,98	3,51 –1,38
8	2,94	4,68–1,97	2,03	3,65 –1,57
10	2,97	5,49–2,05	1,94	3,32 –1,45

V souvislosti s testováním hypotézy H3 byl porovnáván výkon respondentů mezi sekvenčními a kvalitativními schématy na stejné úrovni ΔE_{00} . Mann-Whitneyův test času do odpovědi při WS prokázal signifikantní rozdíly mezi sekvenčními a kvalitativními schématy při barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 2$ ($U = 1375163$, $p = 0,00$), $\Delta E_{00} = 6$ ($U = 1958850$, $p = 0,00$) a $\Delta E_{00} = 10$ ($U = 2176302$, $p = 0,00$). Ve všech případech (i nesignifikantních) byl mediánový čas odpovědi delší u sekvenčních schémat. Stejný závěr vyplývá i z testování ET výsledků: Rozdíl mediánových časů mezi typy schémat je ještě větší než u WS (vyšší časy jsou u sekvenčních schémat) a všechna párová porovnání, s výjimkou $\Delta E_{00} = 4$, byla signifikantně odlišná.

Z těchto výsledků vyplývá, že sekvenční schémata v porovnání s kvalitativními na stejné úrovni barevné vzdálenosti způsobují nižší výkon při řešení zadaného úkolu.

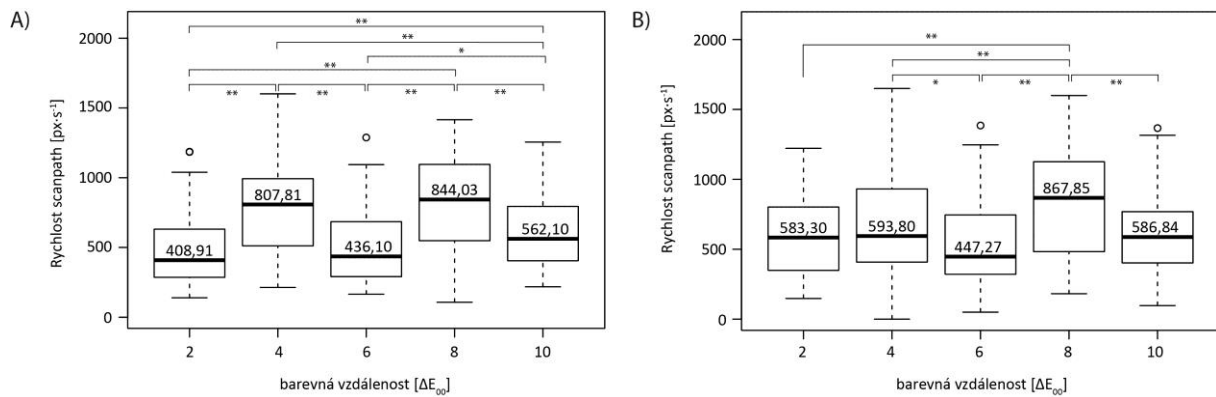
Porovnání dvou areálů: Analýza eye-tracking dat

Frekvence fixací nebyla ovlivněna barevnou vzdáleností. Kruskal-Wallisův test ukázal, že mediánová frekvence fixací se mezi zkoumanými hodnotami barevné vzdálenosti u sekvenčních ($H = 8,09$, $df = 4$, $p = 0,08$, $Mdn = 4,44$ fixací·s⁻¹) ani kvalitativních ($H = 6,55$, $df = 4$, $p = 0,16$, $Mdn = 4,42$ fixací·s⁻¹) schémat neliší. Mann-Whitneyův test dále potvrdil, že mezi sekvenčními a kvalitativními schématy není na stejné úrovni barevné vzdálenosti rozdíl.

Signifikantní výsledky se projeví průměrnou délkou fixací u sekvenčních schémat ($H = 17,03$, $df = 4$, $p = 0,00$); párovým srovnáním byly zjištěny rozdíly pouze mezi $\Delta E_{00} = 2$ a 4 a $\Delta E_{00} = 2$ a 8. Medián průměrné délky fixací pro $\Delta E_{00} = 2$ ($Mdn = 191,30$ ms) je vyšší než pro $\Delta E_{00} = 4$ ($Mdn = 197,45$ ms) i $\Delta E_{00} = 8$ ($Mdn = 175,00$ ms). To může naznačovat více problémů při řešení úkolu s $\Delta E_{00} = 2$. V rámci kvalitativních stupni nebyly nalezeny žádné signifikantní rozdíly ($H = 8,02$, $df = 4$, $p = 0,09$).

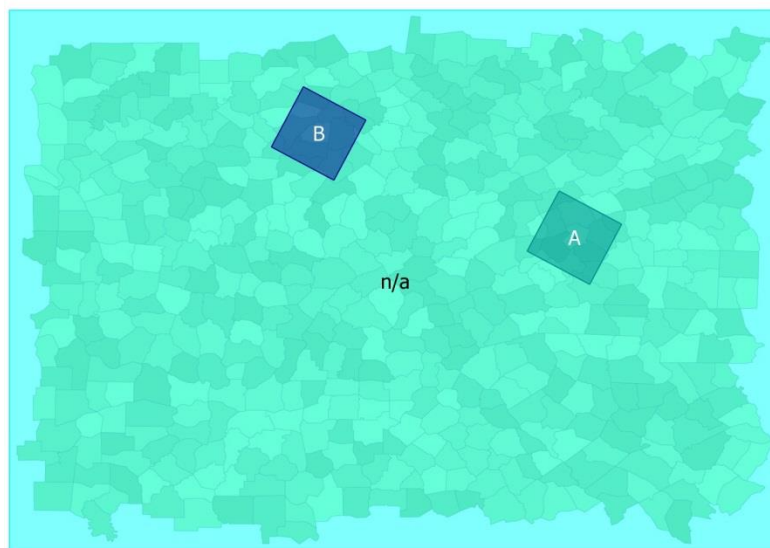
Analýza rychlosti scanpath odhalila mnoho signifikantních rozdílů v rámci sekvenčních ($H = 97,46$, $df = 4$, $p = 0,00$) i kvalitativních ($H = 47,63$, $df = 4$, $p = 0,00$) schémat. Výsledky párového porovnání dopadly podobně u obou typů schémat (obr. 39). Nejvyšší mediánová rychlost scanpath byla zjištěna u kvalitativních schémat $\Delta E_{00} = 8$ ($Mdn = 867,85 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$); u sekvenčních byly nejvyšší hodnoty u $\Delta E_{00} = 8$ a $\Delta E_{00} = 4$ ($Mdn = 844,03 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$ resp. $Mdn = 807,81 \text{ px}\cdot\text{s}^{-1}$).

Eye-tracking metriky se neprojeví předpokládaným způsobem a hypotézu H2 tedy nelze potvrdit.



Obrázek 39. Rychlost scanpath podle barevné vzdálenosti a typu schémat: sekvenční (A) a kvalitativní (B).

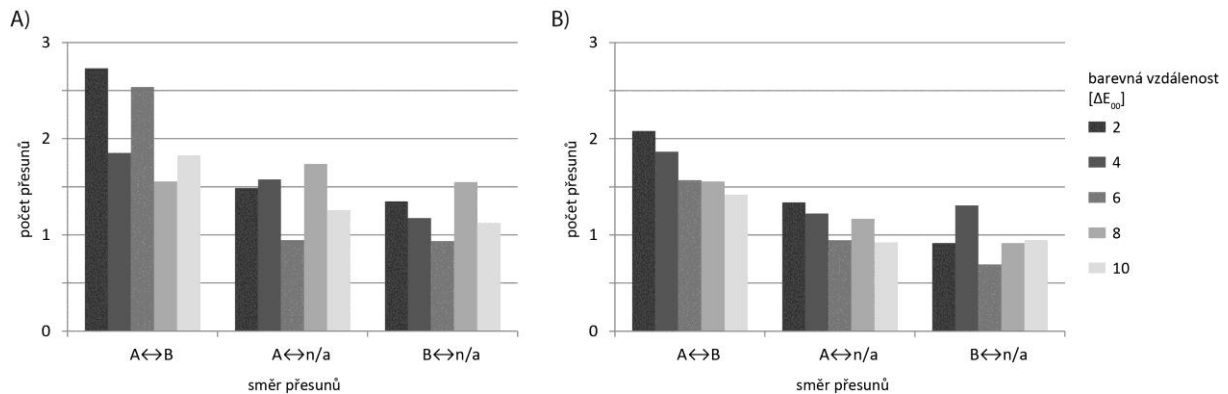
V další fázi byla provedena analýza přesunů (v angl. *gaze transitions*) mezi oblastmi zájmu. Těmi byly v tomto případě vydefinovány oblasti obsahující areály označené k porovnání a jejich bezprostřední okolí (oblasti a a B) a zbytek stimulu (oblast n/a)(obr. 40). Předpokládá se, že k vyřešení úkolu respondenti prováděli oboustranné přesuny mezi označenými oblastmi. Čím více přesunů mezi oblastmi provedli, tím měli větší obtíže zjistit správnou odpověď. Fixace v oblasti n/a může znamenat buď srovnávání okolních barev s označeným párem, nebo prostorovou nepřesnost dat, kdy respondent fixoval do AOI a nebo B, ale jeho pohled nepadl do příslušné AOI.



Obrázek 40. Ukázka konstrukce AOI.

Počet přesunů mezi a a B má klesající tendenci ve směru rostoucí barevné vzdálenosti, jak bylo předpokládáno v hypotéze H2 (obr. 41). U sekvenčních schémat se nepředpokládaně objevuje vyšší počet přesunů u $\Delta E_{00} = 6$. Oproti ostatním ΔE_{00} zde byl naměřen zřetelně nižší počet přesunů z A, resp. B do n/a. To může být způsobeno přesnějším zachycením pohledů přesně do oblastí a a B.

Sekvenční schémata především při $\Delta E_{00} = 2$ a 10 způsobují větší obtíže než kvalitativní. Počet přesunů byl v průměru na jednoho respondenta a stimulus o 0,6 resp. 0,3 vyšší.



Obrázek 41. Přesuny mezi AOI podle barevné vzdálenosti a typu schémat: sekvenční (A) a kvalitativní (B).

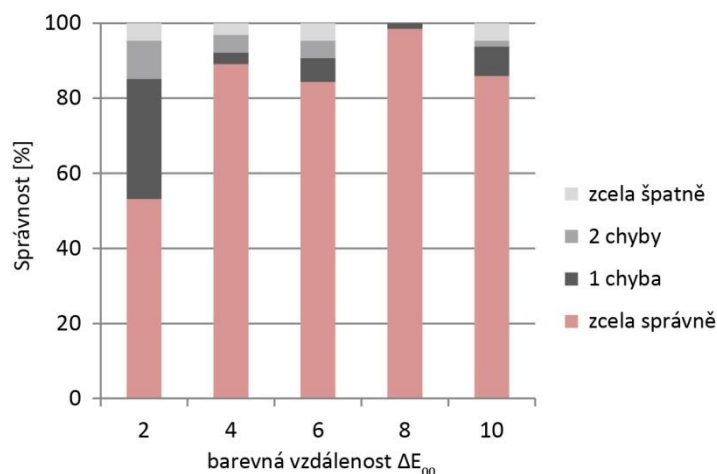
Porovnání tří areálů: Správnost odpovědí

Úloha, v níž měli účastníci seřadit tři areály podle vyjádřené kvantity od nejmenší (nejsvětější barva) po největší (nejtmavší barva), se v souladu s předpokladem ukázala být celkově obtížnější než předchozí typ úlohy (porovnat pouze dva areály). Tato úloha byla navržena pouze pro hodnocení sekvenčních schémat, protože pro kvalitativní schémata by srovnatelné zadání nemělo smysl.

Správnost odpovědí byla posouzena s ohledem na množství chyb, které respondenti udělali v rámci jedné odpovědi. Pokud uvedli pořadí všech tří areálů správně, pak byla odpověď klasifikována jako zcela správná. Pokud v triádě bylo jedno místo uvedeno špatně, byla odpověď označena jako jednochybová atd.

Vyhodnocení správnosti odpovědí ukázalo závislost na barevné vzdálenosti ($\chi^2 = 77,09$, $df = 4$, $p = 0,00$), ale konzistentní stoupající trend správnosti s rostoucí ΔE_{00} se neprojevil (obr. 42). Nejméně zcela správných odpovědí bylo u $\Delta E_{00} = 2$ (53 %), nejvíce u $\Delta E_{00} = 8$ (98 %). Nejvyšší barevná vzdálenost $\Delta E_{00} = 10$ byla až na třetím místě s 84 % zcela správných odpovědí, což může být způsobeno konkrétním experimentálním nastavením u daných stimulů.

Ačkoli pravděpodobně nelze stanovit hranici akceptovatelné míry správnosti odpovědí je zcela evidentní, že barevná vzdálenost $\Delta E_{00} = 2$ je pro daný typ otázky zcela nedostačující.



Obrázek 42. Správnost odpovědí úlohy na porovnání tří areálů.

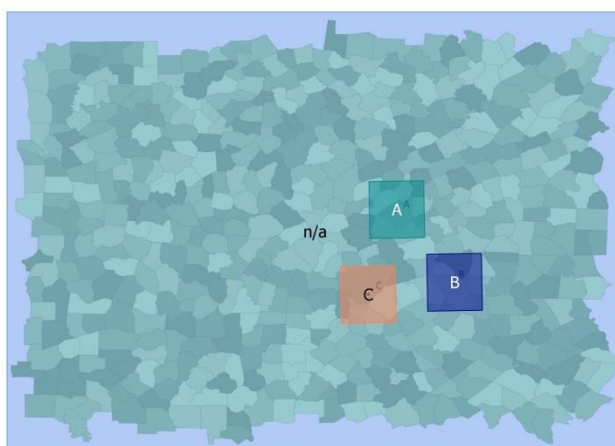
Porovnání tří areálů: Čas do odpovědi a eye-tracking metriky

Analýza času do odpovědi, ani jedné z eye-tracking metrik, nepotvrdila vliv barevné vzdálenosti na schopnost respondentů vyřešit úkol (čas $H = 8,51$, $df = 4$, $p = 0,07$; délka fixací $H = 2,83$, $df = 4$, $p = 0,58$; frekvence fixací $H = 1,73$, $df = 4$, $p = 0,78$; rychlost scanpath $H = 11,26$, $df = 4$, $p = 0,02$). Signifikantní výsledky u rychlosti scanpath byly způsobeny pouze odlišností mezi $\Delta E_{00} = 2$ a 4.

Hypotézy H1 ani H2 nebyly na základě těchto výsledků potvrzeny.

Porovnání tří areálů: přesuny mezi AOI

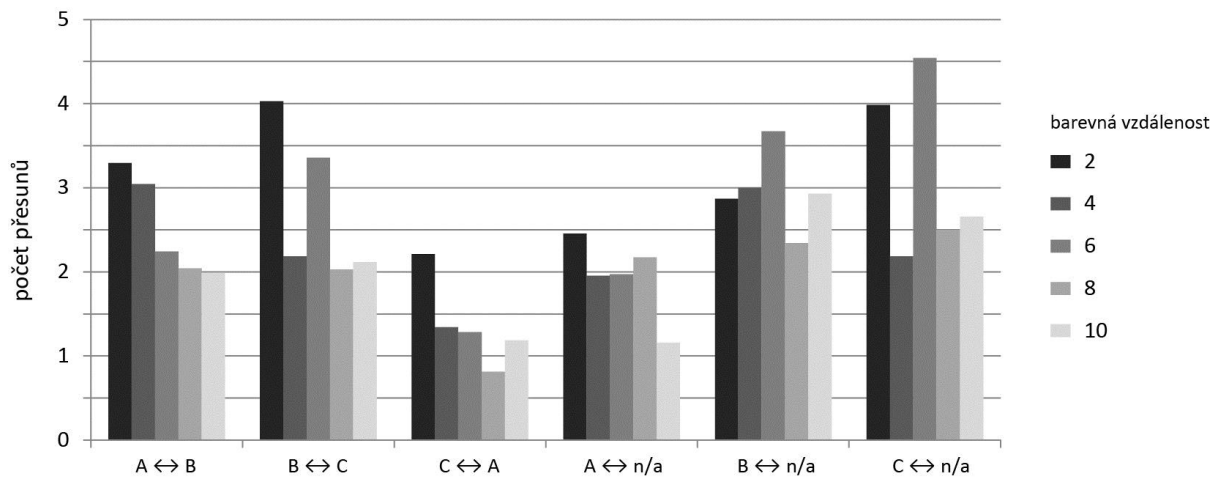
Oblasti zájmu byly definovány stejným způsobem jako v předchozí úloze: označeným areálům byly přiřazeny oblasti A, B a C (oblast a odpovídá nejsvětlejší a C nejtmaší barvě z trojice). Zbytek stimulu byl označen jako oblast n/a (obr. 43).



Obrázek 43. Ukázka konstrukce AOI.

Na přesunech mezi hlavními oblastmi (A, B a C) je patrný vliv rostoucí barevné vzdálenosti na snižujícím se počtu přesunů (obr. 44). Zároveň lze sledovat všeobecně nižší počet přesunů $C \leftrightarrow A$; v tomto případě se jedná o barevně vzdálenější a tedy snadněji rozeznatelnou dvojici. Vysoký počet přesunů mezi hlavními oblastmi a zbytkem mapy (n/a) naznačuje potřebu respondentů porovnávat barevné odstíny nejen v rámci určených areálů, ale i ve zbytku mapy. Zároveň to může být způsobeno

nepřesností zařízení, které zaměřilo polohu pohledu mimo definovanou AOI, i když se tam fakticky respondent díval. Bohužel nelze s určitostí potvrdit ani jednu z variant ani hlubším zkoumáním konkrétních trajektorií pohybu očí.



Obrázek 44. Průměrný počet přesunů na jednoho respondenta a jeden experimentální stimulus mezi AOI.

5.2.3 Závěr

Bez ohledu na menší rozdíly mezi výsledky získané prostřednictvím WS a ET, analýza dat jasně ukázala, že nejnižší testovaná hodnota barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 2$ vedla k největšímu počtu chyb a zpomalení odpovědí. S rostoucí barevnou vzdáleností byly odpovědi správnější a rychlejší. Nejvyšší testovaná barevná vzdálenost $\Delta E_{00} = 10$ byla potvrzena jako ‚bezpečná‘. Vhodnost ostatních testovaných hodnot ΔE_{00} je diskutabilní. Úkol, který byl v průběhu experimentů respondentům zadán, byl extrémně jednoduchý a nevyžadoval žádné speciální znalosti, proto by správnost měla být téměř stoprocentní. Vzhledem k tomu, že to tak není, lze předpokládat, že zvolené hodnoty barevné vzdálenosti nejsou dostačující, nebo barevnost testovaných schémat není optimální.

V této konkrétní studii analýza eye-tracking metrik nepřinesla hlubší vysvětlení problematiky. To je pravděpodobně dáno jednoduchostí zadání, které nevyžadovalo hlubší zkoumání stimulů, a tedy nepřineslo složitější trajektorie pohledu. Respondenti víceméně oscilovali pohledem mezi dvěma vyznačenými body.

Výkonnostní metriky a počet přesunů ukázaly, že rozlišení dvou areálů sekvenčních stupnic je obtížnější než areálů kvalitativních stupnic, i když je barevná vzdálenost stejná. To může být způsobeno tím, že lidé mají větší schopnosti rozlišit barvy, které dokáží pojmenovat (Brewer, 1996b). Zapamatovat si odstín jednoho barevného tónu může být velice obtížné až nemožné (Albers, 2013).

5.3 Euclid: Vliv vzdálenost znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení

Klíčem k úspěšnému předávání prostorové informace mapou je umožnit jejímu čtenáři identifikovat význam mapových znaků a rozlišit je navzájem vhodným uplatněním vizuálních proměnných. Cílem studie *Euclid* je vyzkoumat vliv dalšího pravděpodobného činitele rozlišitelnosti znaků na mapě, kterým je jejich vzájemná prostorová vzdálenost. Doposud neověřenou hypotézou je, že schopnost porovnat znaky je tím obtížnější, čím dále od sebe znaky budou.

Prostorové rozmístění znaků (a tedy i jejich prostorová vzdálenost) je dáno skutečným výskytem mapovaných jevů, které mapové znaky zastupují, a není samozřejmě možné ho výrazně přizpůsobovat pro zvýšení celkové čitelnosti mapy (podle uvedené hypotézy k dosažení lepší čitelnosti by to znamenalo zmenšit prostorovou vzdálenost). Lze však manipulovat s nastavením hodnot vizuálních proměnných, zvýšit tím vizuální vzdálenost mezi znaky a umožnit jejich efektivnější rozlišování, které by při dané prostorové vzdálenosti mohlo činit problémy.

V předchozích experimentech *Labels* (podkapitola 5.1) a *Schemes* (podkapitola 5.2) byla samostatně studována barevná vzdálenost a byla potvrzena hypotéza, že s rostoucí barevnou vzdáleností mezi znaky a jinými prvky na mapách se zvyšuje schopnost uživatelů efektivně vyhledat a rozlišit požadovanou informaci na mapě. Cílem experimentu (*Euclid*) je za cíl dát barevnou vzdálenost do souvislosti s prostorovou vzdáleností a zjistit, jaký je vliv prostorové vzdálenosti na rozlišitelnost kategorií sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

5.3.1 Metody

Cílem experimentu *Euclid* bylo odpovědět na dvě výzkumné otázky: a) Jaký vliv má barevná vzdálenost mezi znaky na jejich čitelnost, b) Jaký vliv má prostorová vzdálenost mezi znaky na jejich čitelnost. Aby výsledky byly přehledné, jejich prezentace byla rozdělena do dvou částí. První otázka byla řešena v experimentu *Schemes* (podkapitola 5.2). Uvedené metody, respondenti a materiály jsou s touto studií shodné a v následujícím textu jsou uvedena pouze specifika, která jsou pro řešené téma důležitá.

Cílem experimentu *Euclid* bylo zjistit vliv prostorové vzdálenosti na schopnost respondentů rozlišit plošné znaky na základě barevnosti jejich výplně. Bylo předpokládáno, že s rostoucí vzdáleností mezi znaky tato schopnost klesá.

Pro ověření hypotéz byl sledován vliv dvou nezávislých proměnných: *prostorové vzdálenosti* a *typu barevného schématu* na průběh pěti závislých proměnných: *přesnosti* (správnosti) odpovědi, *času*, *frekvence fixací*, *délky fixací*, *rychlosti scanpath* v rámci celého stimulu i v definovaných oblastech zájmu (AOI).

Účastníci experiment

Testování experimentu *Euclid* probíhalo současně s experimentem *Schemes* se stejnými účastníky. Jejich charakteristika je uvedena v podkapitole 5.2.1.

Design a průběh experiment

Testování experimentu *Euclid* probíhalo současně s experimentem *Schemes*. Jejich design a průběh je proto shodný a je popsán v podkapitole 5.2.1.

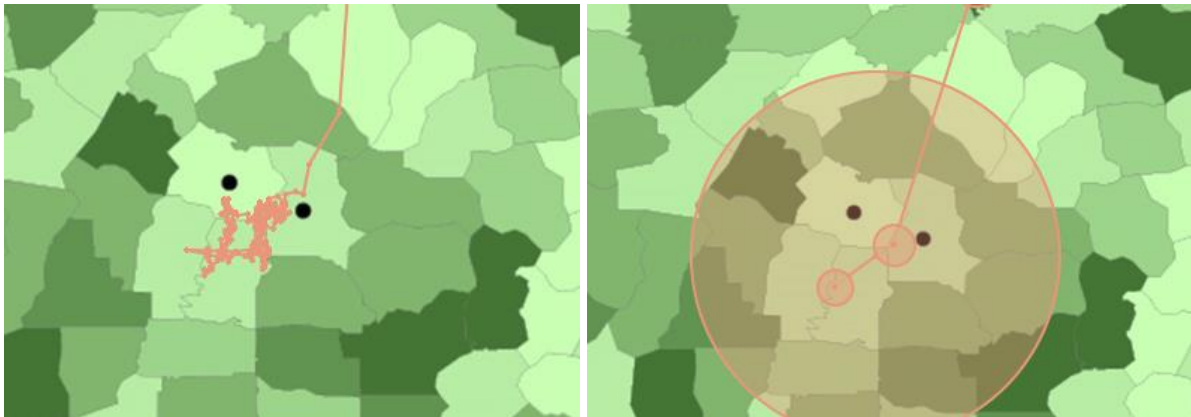
Stimuly

Pro experimenty *Euclid* a *Schemes* byly použity shodné experimentální stimuly. Jejich parametry jsou uvedeny v podkapitole 5.2.1. V experimentu *Euclid* je hodnocen vliv *prostorové vzdálenosti* na rozlišitelnost barev a proto jsou uvedeny další parametry, které jsou pro řešení téma klíčové.

Na každém stimulu byly vybrány a tečkou označeny dva nebo tři areály (obr. 46, příloha 4 a 8). Vzájemná vzdálenost těchto areálů byla kontrolována a mohla nastat jedna ze tří možností:

- (a) areály spolu sousedí ($\Delta d = 1$), zkoumáno pouze při WS
- (b) na spojnici centroidů areálů leží minimálně 2, maximálně 3 jiné areály ($\Delta d = 2$)
- (c) na spojnici centroidů areálů leží minimálně 8, maximálně 13 jiné areály ($\Delta d = 3$)

Pilotní eye-tracking studií bylo zjištěno, že nemá smysl zkoumat stimuly, kde je prostorová vzdálenost mezi areály k porovnání $\Delta d = 1$. Vzhledem k tomu, že se pohyb očí při zadaném typu otázek odehrával víceméně mezi porovnávanými areály (obr. 45), nebylo by možné (vzhledem k přesnosti eye-trackeru a vzájemné blízkosti areálů) přesně stanovit, který areál je v danou chvíli prohlížen, a eye-tracking záznamy by tak nemohly být využity v plné míře. Proto nebyly stimuly s $\Delta d = 1$ do ET experimentu zahrnuty.



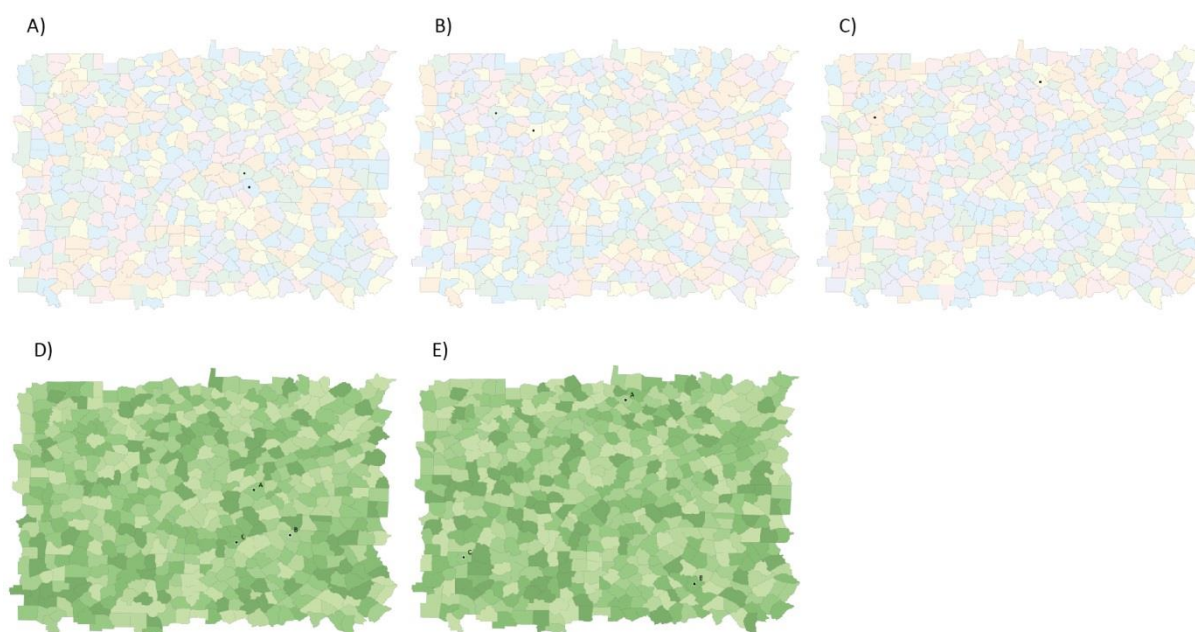
Obrázek 45. Vizualizace ET dat z pilotní studie vybraného respondenta při porovnávání areálů o $\Delta d=1$. Jeho pohled fixuje na hranice mezi areály a vzhledem k schopnosti posuzovat dvě blízké barvy periférním viděním a z důvodu nepřesnosti ET zařízení není možné stanovit, kam přesně upírá svůj pohled.

Tabulka 11 uvádí konkrétní odpovídající úhlové vzdálenosti pro všechny uvedené úrovně Δd . Úloha na porovnání tří areálů byla zkoumána pouze prostřednictvím ET.

Barevná vzdálenost mezi označenými areály byla $\Delta E_{00} = 2$, $\Delta E_{00} = 4$, $\Delta E_{00} = 6$, $\Delta E_{00} = 8$, $\Delta E_{00} = 10$ nebo $\Delta E_{00} = 0$ (stejná barva). Prostorové rozmístění ostatních barev (výplně neoznačených areálů) bylo napříč experimentem generováno náhodně, aby byl zamezen (nebo rozptýlen) simultánní kontrast.

Tabulka 11. Úhlové vzdálenosti mezi centroidy porovnávaných areálů pro všechny testované úrovně Δd .

	WS	ET
	pozorovací vzdálenost 50 cm rozměry stimulu 800×600 px	pozorovací vzdálenost 70 cm rozměry stimulu 1920×1080px
$\Delta d = 1$	méně než 1.5°	-
$\Delta d = 2$	2.5–3.0°	3.0–4.0°
$\Delta d = 3$	6.0–7.5°	10.0–13.0°



Obrázek 46. Vybrané experimentální stimuly pro úlohu na porovnání dvou areálů označených tečkou s $\Delta d = 1$ (A), $\Delta d = 2$ (B), $\Delta d = 3$ (C) a na porovnání tří areálů $\Delta d = 2$ (D) a $\Delta d = 3$ (E).

5.3.2 Výsledky

Z naměřených dat byla analyzována správnost odpovědi a čas do odpovědi a dále vybrané eye-tracking metriky společně s přesuny (v angl. *gaze transitions*) mezi AOI.

Výkon účastníků (správnost a čas) byl hodnocen především z dat získaných v průběhu WS. Získané výsledky byly ověřeny analýzou stejných proměnných zjištěných ET experimentem, při kterém byla otestována menší populace a výběr podmínek.

Hlavními hypotézami experimentu bylo:

(H1) Větší prostorová vzdálenost snižuje výkon respondentů při získávání informací z mapy (nižší správnost odpovědi, delší čas do označení odpovědi).

(H2) Větší prostorová vzdálenost způsobuje nárůst délky fixací, zvýšení frekvence fixací, zrychlení scanpath a nárůst počtu opakovaných návštěv (přesunů) mezi porovnávanými areály.

(H3) Sekvenční a kvalitativní schémata nevykazují na stejné úrovni prostorové vzdálenosti rozdílnosti v žádné ze sledovaných závislých proměnných.

Pro lepší přehlednost jsou výsledky prezentovány odděleně pro oba typy úkolů (porovnání dvou areálů a porovnání tří areálů)

Porovnání dvou areálů: Správnost odpovědí

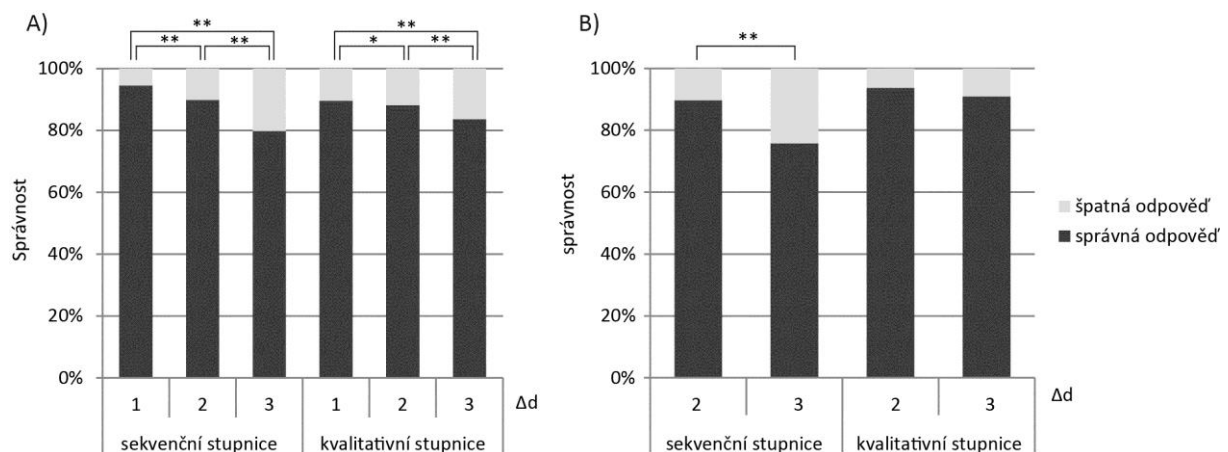
Zjištěná správnost odpovědí byla seskupena podle úrovně prostorové vzdálenosti ($\Delta d = 1$, $\Delta d = 2$ a $\Delta d = 3$) a typů barevných schémat (sekvenční a kvalitativní).

Za nesprávnou byla klasifikována odpověď, při níž respondent označil porovnávané areály jako různě barevné, přestože byly stejné, a naopak. Zároveň neurčitá odpověď („Nevím“) byla klasifikována jako nesprávná, protože indikuje neschopnost odpovědět na zadanou otázku.

Chí-kvadrát test dobré shody prokázal, že podíl správných a špatných odpovědí ve WS je závislý na prostorové vzdálenosti u obou variant barevných schémat: sekvenčních ($\chi^2 = 405,31$, $df = 2$, $p = 0,00$) i kvalitativních ($\chi^2 = 65,57$, $df = 2$, $p = 0,00$). Výsledky ET tuto závislost potvrdily pouze u sekvenčních schémat ($\chi^2 = 22,16$, $df = 1$, $p = 0,00$). U kvalitativních schémat se rozdíl ve správnosti odpovědí mezi $\Delta d = 2$ a $\Delta d = 3$ nepodařilo prokázat ($\chi^2 = 1,89$, $df = 1$, $p = 0,17$).

Porovnáním správnosti odpovědí na třech úrovních prostorové vzdálenosti mezi sekvenční a kvalitativními schématy bylo zjištěno, že správnost odpovědí WS je závislá na typu barevného schématu ($\chi^2 = 16,80$, $df = 2$, $p = 0,00$), zatímco u ET tato závislost nebyla potvrzena ($\chi^2 = 2,59$, $df = 1$, $p = 0,11$).

Hypotéza H1 byla výsledky WS potvrzena: schopnost respondentů správně porovnat kvalitu i kvantitu dvou areálů konzistentně klesá s jejich vzájemnou vzdáleností na mapě (obr. 47a). ET tuto hypotézu potvrdil pouze pro sekvenční schémata (obr. 47b); signifikantní pokles správnosti odpovědí se u kvalitativních schémat neprojevil, což naznačuje, že vliv prostorové vzdálenosti hraje vyšší význam při určování kvantity jevu a to je v rozporu s hypotézou H3.



Obrázek 47. Správnost odpovědí sledovaná při WS (A) a ET (B).

Porovnání dvou areálů: Čas do odpovědi

Čas do odpovědi byl analyzován pouze pro správně zodpovězené otázky.

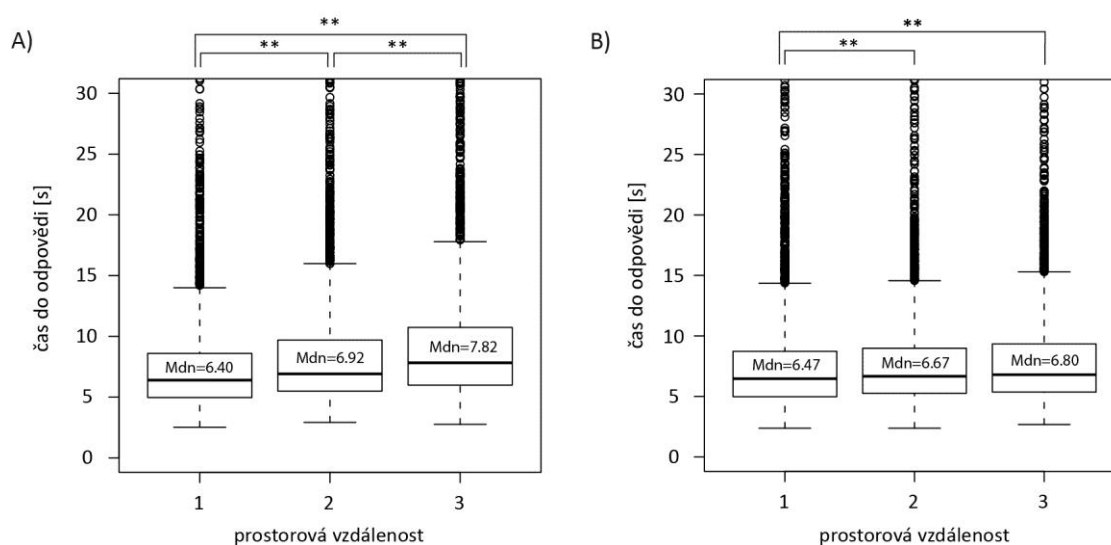
Kruskal-Wallisův test na WS datech prokázal, že čas potřebný k vyřešení otázky je v případě obou typů barevných schémat závislý na vzdálenosti mezi symboly (sekvenční: $H = 369,74$, $p = 0,00$;

kvalitativní: $H = 32,53$, $p = 0,00$) a zároveň s rostoucí vzdáleností se zvyšuje čas potřebný pro nalezení správné odpovědi (obr. 48).

Mann-Whitneyův test u ET sekvenčních schémat neprojevil signifikantní rozdíl mezi $\Delta d = 2$ a $\Delta d = 3$, zatímco u kvalitativních ano (zcela naopak než tomu bylo v případě správnosti).

Výsledky WS korespondují s dříve učiněným zjištěním o správnosti i s hypotézou H1: Rostoucí vzdálenost znaků na mapě zvyšuje obtížnost jejich správného porovnání. ET tento závěr potvrzuje jen částečně.

Porovnání mezi typy schémat Mann-Whitneyovým testem (sekvenční vs. kvalitativní) ukázalo, že sekvenční schémata jsou na základě porovnání mediánových časů pro daný úkol na stejné úrovni prostorové vzdálenosti hůře čitelné (tab. 13). Tento závěr je v rozporu s původní hypotézou H3.



Obrázek 48. Čas potřebný k nalezení odpovědi pro jednotlivé úrovně prostorové vzdálenosti na mapách se A) sekvenčními a B) kvalitativními schématy.

Tabulka 12. Výsledky Mann-Whitneyova (U) a Kruskal-Wallisova (H) testu na porovnání času do odpovědi mezi úrovněmi prostorové vzdálenosti a typy barevných schémat. Signifikantní výsledky jsou zvýrazněny tučně.

podmínka	Web survey		Eye-tracking	
	U (H)	p	U	p
sekvenční ~ kvalitativní	44497742	0,00	176059,5	0,46
sekvenční 1~2~3	(H) 369,74	0,00	-	-
kvalitativní 1~2~3	(H) 32,53	0,00	-	-
sekvenční 2~3	-	-	36277,5	0,28
kvalitativní 2~3	-	-	43444,5	0,04
sekvenční 1 ~ kvalitativní 1	6183307	0,41	-	-
sekvenční 2 ~ kvalitativní 2	4733845	0,00	52634,0	0,00
sekvenční 3 ~ kvalitativní 3	3937946	0,00	51011,5	0,00

Tabulka 13. Mediánové hodnoty času do odpovědi pro sledované úrovně prostorové vzdálenosti a typy barevných schémat.

barevné schéma	Δd	WS [s]	ET [s]
	všechny	6,95	3,05
sekvenční	1	6,40	--
	2	6,92	2,81
	3	7,82	3,16
	všechny	6,62	2,26
kvalitativní	1	6,47	--
	2	6,67	2,13
	3	6,80	2,49

Porovnání dvou areálů: Eye-tracking data

Vliv zkoumaných podmínek ($\Delta d = 2$ a $\Delta d = 3$) na čitelnost mapy byl hodnocen analýzou metrik *frekvence fixací*, *průměrná délka fixací* a *rychlost scanpath*.

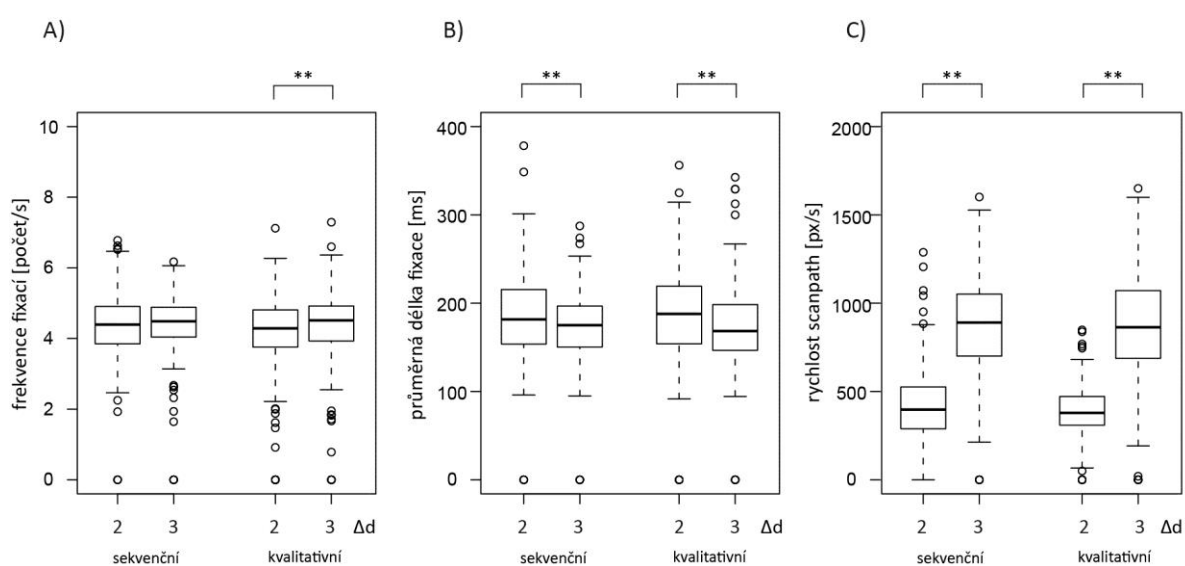
Hypotéza H2 (větší vzdálenost mezi znaky ztěžuje jejich rozlišitelnost) byla potvrzena pro oba typy barevných schémat průměrnou délkou fixací a rychlostí scanpath. Mann-Whitneyův test potvrdil signifikantně kratší fixace a výrazně rychlejší scanpath pro $\Delta d = 3$ (tab. 14 a 15, obr. 49). Frekvence fixací vliv vzdálenosti prokázala pouze u kvalitativních schémat. Hypotéza H3 (schopnost porovnat označené areály nebude na dané prostorové vzdálenosti ovlivněna typem použité barevné stupnice) byla potvrzena všemi metrikami: mezi kvalitativními a kvantitativními stupnicemi nebyla prokázána odlišnost při $\Delta d = 2$ ani $\Delta d = 3$ (tab. 14).

Tabulka 14. Výsledky Mann-Whitneyova testu na porovnání eye-tracking metrik mezi úrovněmi prostorové vzdálenosti a typy barevných schémat. Signifikantní výsledky jsou zvýrazněny tučně.

podmínka	Frekvence fixací		Průměrná délka fixace		Rychlost scanpath	
	<i>U</i>	<i>p</i>	<i>U</i>	<i>p</i>	<i>U</i>	<i>p</i>
sekvenční ~ kvalitativní	176059,5	0,46	57012,5	0,00	6436.5	0,00
sekvenční 2~3	36063,5	0,23	43902,0	0,00	6848.0	0,00
kvalitativní 2~3	42142,0	0,00	57012,5	0,00	6436.5	0,00
sekvenční 2 ~ kvalitativní 2	45657,5	0,21	41790,5	0,54	45900,5	0,17
sekvenční 3 ~ kvalitativní 3	42269,5	0,83	43614,5	0,66	43531,0	0,69

Tabulka 15. Mediánové hodnoty eye-tracking metrik pro sledované úrovně prostorové vzdálenosti a typy barevných schémat. Signifikantně odlišné páry jsou vyznačeny tučně.

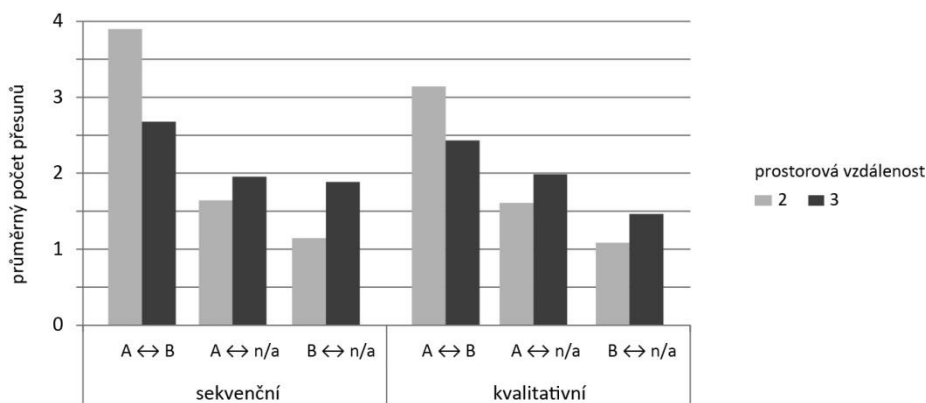
typ schématu	Δd	Frekvence fixací [počet·s ⁻¹]	Průměrná délka fixace [ms]	Rychlost scanpath [px·s ⁻¹]
sekvenční	2+3	4,44	177,95	588,60
kvalitativní	2+3	4,42	178,10	572,11
sekvenční	2	4,39	181,7	397,71
	3	4,48	175,0	890,03
kvalitativní	2	4,28	187,85	378,76
	3	4,51	168,50	864,19



Obrázek 49. Eye-tracking metriky podle prostorové vzdálenosti a typu barevného schématu: (A) frekvence fixací, (B) průměrná délka fixací, (C) rychlost scanpath.

V další fázi byla provedena analýza přesunů mezi oblastmi zájmu (AOI). Uváděné počty přesunů představují průměr pro danou zkoumanou podmínku a jednoho respondenta. Z obrázku 50 je patrné, že počet přesunů A↔B při $\Delta d = 2$ je značně vyšší než při $\Delta d = 3$, přičemž u sekvenčních stupnic je tento rozdíl výraznější než u kvalitativních. Naopak při $\Delta d = 3$ je vyšší počet přesunů A↔n/a resp. B↔n/a. Zkoumáním záznamů ET dat bylo zjištěno, že na kratších vzdálenostech jsou respondenti schopni „přeskočit“ z a přímo do B, zatímco při větší vzdálenosti udělají „mezifixaci“ v prostoru n/a, kterou zjevně nevyužívají k prohlédnutí oblasti (fixace je moc krátká), ale pouze k „mezipřistání“. Tento výsledek přímo nenasvědčuje tomu, že by podmínka $\Delta d = 3$ byla obtížnější než $\Delta d = 2$, ale je patrné, že vzdálenost $\Delta d = 3$ je pro jednorázový přesun moc dlouhá.

Z výsledků je však zcela zjevná, alespoň při $\Delta d = 2$, rozdílnost mezi sekvenčním a kvalitativním schématem, kdy u prvního zmíněného respondenta vykonali v průměru o 0,8 přesunů více, což naznačuje větší obtížnost, a tedy rozporuje hypotézu H3.

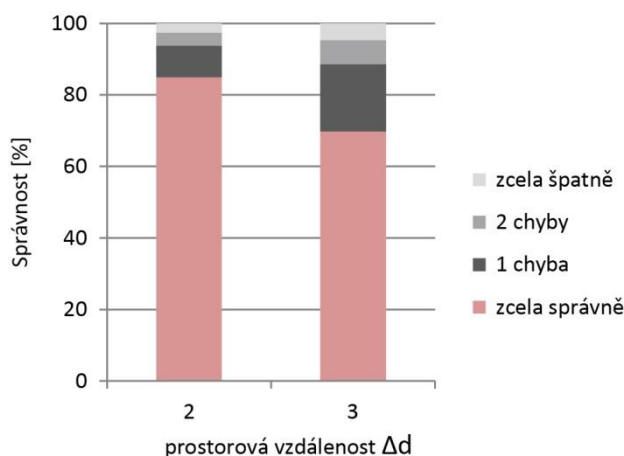


Obrázek 50. Průměrný počet přesunů na jednoho respondenta a jeden experimentální stimulus AOI.

Porovnání tří areálů: Správnost odpovědí

Úloha, v níž měli účastníci seřadit tři areály podle vyjádřené kvantity od nejmenší (nejsvětější barva) po největší (nejtmavší barva) se v souladu s předpokladem ukázala být celkově obtížnější než předchozí typ úlohy (porovnat pouze dva areály). Tato úloha byla navržena pouze pro hodnocení sekvenčních schémat, protože pro kvalitativní by srovnatelné zadání nemělo smysl.

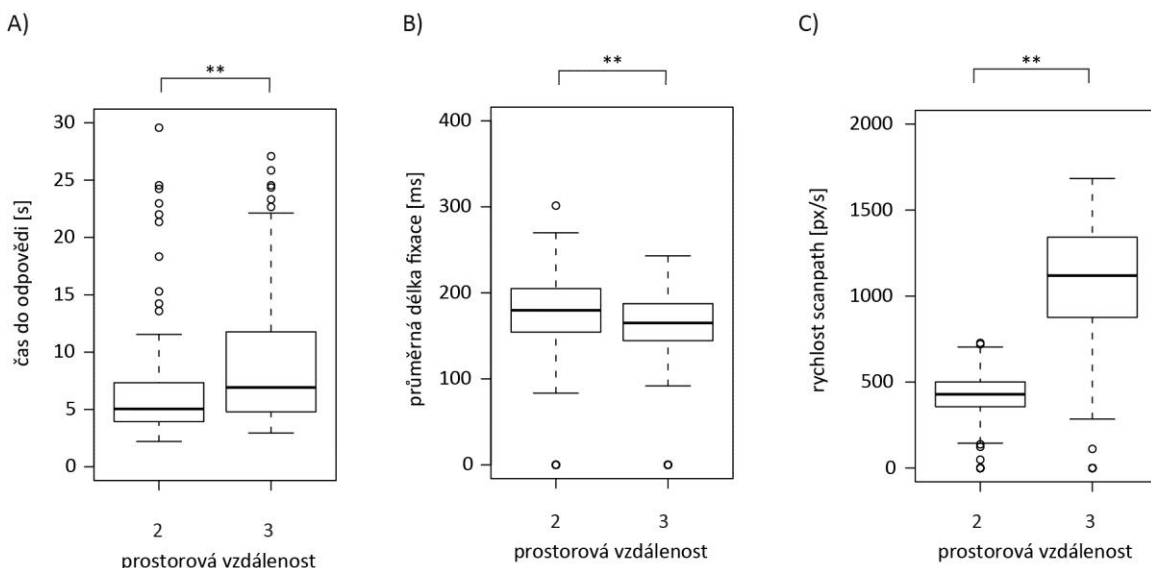
Menší vzdálenost mezi porovnávanými areály se odrazila ve výrazně vyšší správnosti odpovědí ($\chi^2=12.58$, $df=1$, $p=0,00$): při $\Delta d=2$ bylo zjištěno 85 %, zatímco při $\Delta d=3$ pouze 69 % zcela správných odpovědí. Při $\Delta d=3$ je přirozeně vyšší podíl jedno, dvou i zcela chybných odpovědí (obr. 51).



Obrázek 51. Správnost odpovědí úlohy na porovnání tří areálů.

Porovnání tří areálů: Čas do odpovědi a eye-tracking metriky

Rozdílnost času do odpovědi ($W=7266,0$, $p=0,00$), průměrnou délkou fixací ($W=13223,0$, $p=0,00$) a rychlostí scanpath ($W=1986,5$, $p=0,00$) mezi $\Delta d=2$ a $\Delta d=3$ potvrdily závěry z vyhodnocení jednoduššího typu otázky na sekvenčních schématech (srovnání dvou areálů) a tedy i hypotézy H1 a H2: větší obtíže s nalezením správné odpovědi jsou při $\Delta d=3$ (obr. 52). Frekvence fixací neprojevila signifikantní výsledky, stejně jako u porovnávání dvou areálů.

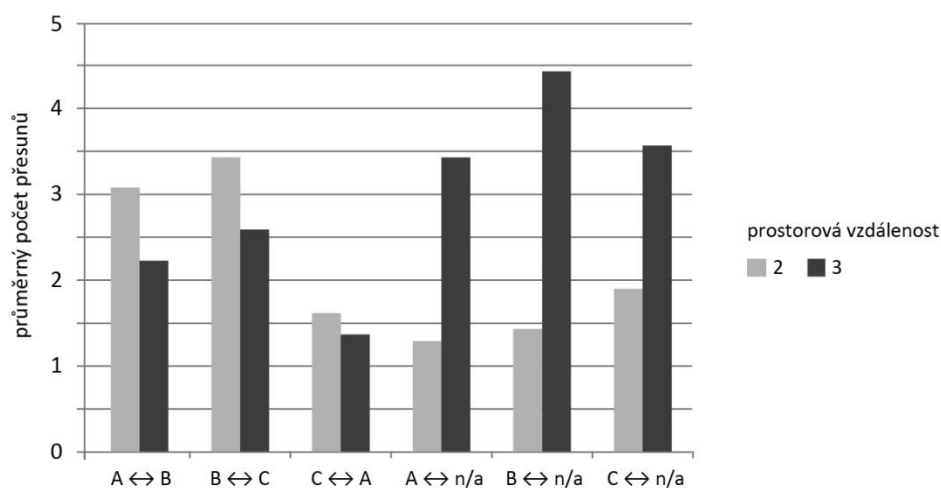


Obrázek 52. Naměřené hodnoty času do odpovědi a ET metrik vykazující signifikantní rozdíly.

Porovnání tří areálů: přesuny mezi AOI

Oblasti zájmu byly definovány stejným způsobem, jako v experimentu *Schemes* (podkapitola 5.2.2).

Mezi barevně bližšími AOI ($A \leftrightarrow B$ a $B \leftrightarrow C$) bylo provedeno celkově více přesunů než mezi barevně vzdálenějšími AOI ($A \leftrightarrow C$). V případě tohoto úkolu se ještě mnohem silněji projevil vliv dříve popsaných ‚mezifixací‘: při $\Delta d = 3$ došlo v porovnání s $\Delta d = 2$ k nižší míře přesunů mezi hlavními AOI (A, B, C), zatímco počet přesunů mezi A, B nebo C a n/a je značně vyšší (obr. 53).



Obrázek 53. Průměrný počet přesunů na jednoho respondenta a jeden experimentální stimulus mezi AOI.

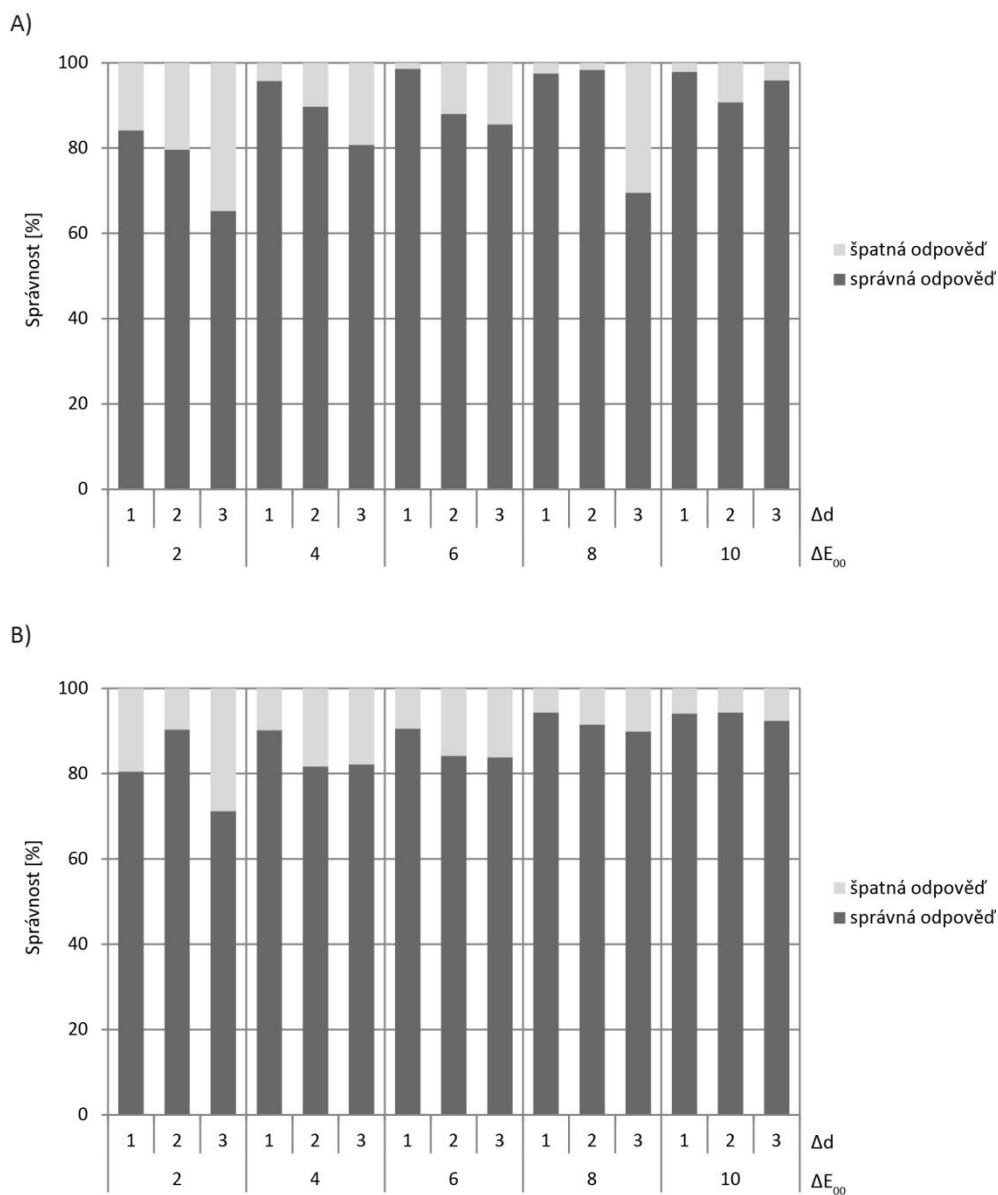
Souvstažnost mezi barevnou a prostorovou vzdáleností

Jako logické vyvrcholení experimentů *Euclid* a *Schemes*, bylo zkoumáno vzájemné působení barevné i prostorové vzdálenosti na rozeznatelnost areálů. Vzhledem k tomu, že vliv barevné vzdálenosti se neprojevil na eye-tracking metrikách, je toto závěrečné srovnání založeno pouze na analýze správnosti a času do odpovědi z WS.

U sekvenčních schémat lze identifikovat klesající schopnost rozlišit dva areály s jejich narůstající vzájemnou vzdáleností (obr. 54). Je to patrné především při $\Delta E_{00} = 2, 4$ a 6 . Při $\Delta E_{00} = 8$ je pokles u $\Delta d = 3$ skokový a při $\Delta E_{00} = 10$ jsou rozdílnosti zanedbatelné. To nasvědčuje tomu, že tato barevná vzdálenost je víceméně bezpečná (ačkoli ne zcela 100%) pro použití při konstrukci sekvenčních schémat.

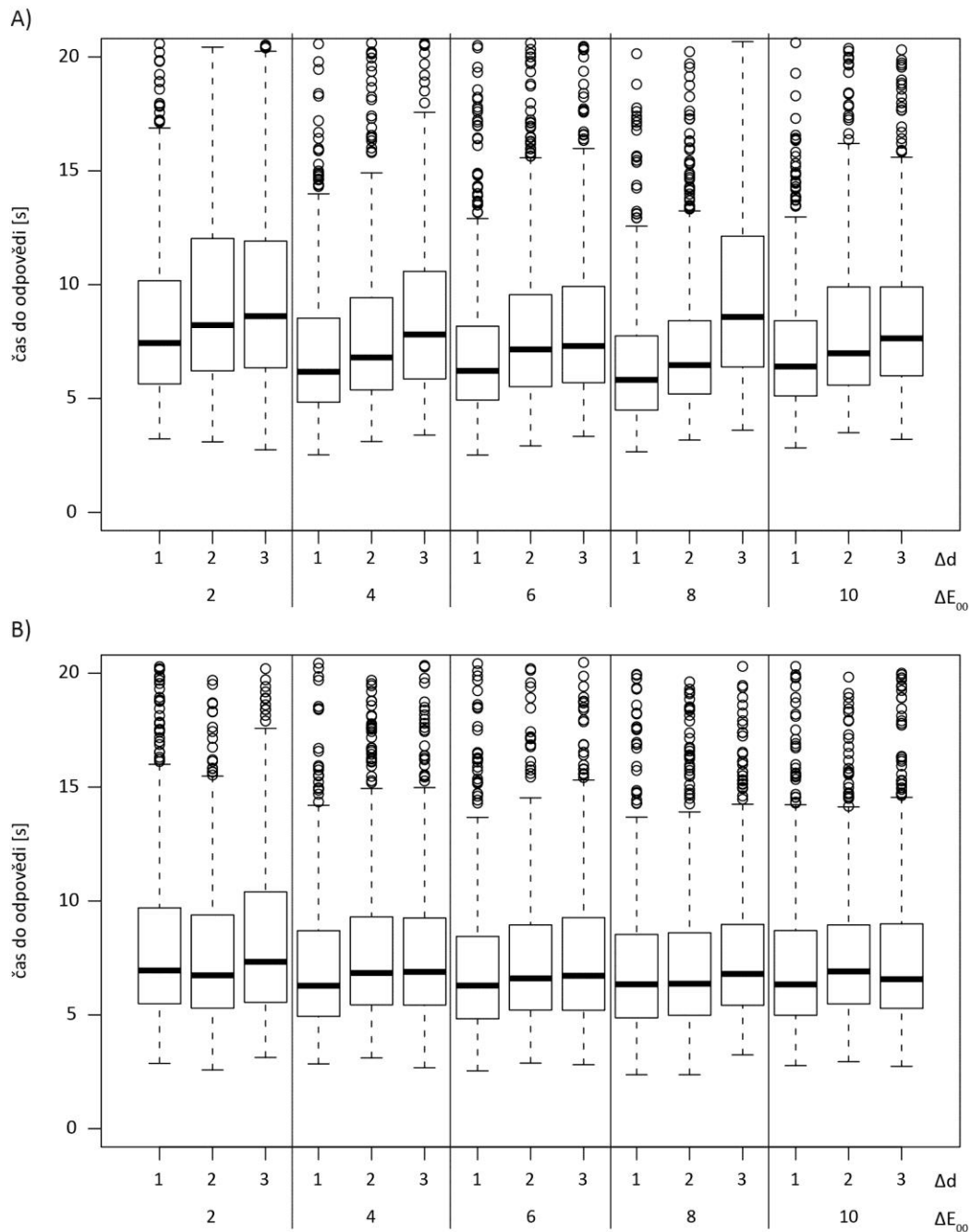
Kvalitativní schémata k výše uvedenému závěru neinklinují. Mimo $\Delta E_{00} = 2$ je zde patrná vyšší správnost odpovědí při porovnávání sousedících areálů ($\Delta d = 1$). Další dvě úrovně Δd mají srovnatelnou správnost a lze tak říct, že rozlišení areálů na základě různých barevných tónů není ovlivněno vzájemnou vzdáleností v takové míře jako při rozlišování dvou barevných odstínů.

Dále je zajímavé, že rozlišení dvou sousedících areálů ($\Delta d = 1$) je jednodušší u sekvenčních schémat než u kvalitativních.



Obrázek 54. Správnost odpovědí podle barevné vzdálenosti (ΔE_{00}), prostorové vzdálenosti (Δd) a typu barevných schémat: (A) sekvenční, (B) kvalitativní.

Čas do odpovědi potvrzuje vyšší citlivost sekvenčních schémat na prostorovou vzdálenost: ve všech skupinách podle barevné vzdálenosti je nejkratší čas při $\Delta d = 1$ a nejdelší při $\Delta d = 3$ (obr. 55). U kvalitativních schémat takové rozdíly nejsou.



Obrázek 55. Čas do odpovědi podle barevné vzdálenosti (ΔE_{00}), prostorové vzdálenosti (Δd) a typu barevných schémat: (A) sekvenční, (B) kvalitativní.

5.3.3 Závěr

Hlavní hypotézou experimentu *Euclid* bylo, že s rostoucí prostorovou vzdáleností areálových znaků na mapovém listu klesá schopnost uživatelů tyto areály správně porovnat (posoudit odlišnosti jejich kvantity resp. kvality vyjádřené pomocí sekvenčních resp. kvalitativních barevných škál).

Analýzou správnosti odpovědí, času do jejich nalezení, průměrné délky fixací i rychlosti scanpath bylo potvrzeno, že schopnost respondentů správně porovnat kvalitu i kvantitu dvou areálů konzistentně klesá s jejich vzájemnou vzdáleností na mapě. Stejně závěry byly zjištěny při úkolu na srovnání kvantity tří areálů. Analýza přesunů mezi AOI tuto hypotézu přímo nepotvrdila. Bylo zjištěno, že srovnání vzdálenějších areálů vyžaduje provedení ‚mezifixace‘, což může snížit efektivitu rozhodování.

Analýza většiny metrik, včetně přesunů mezi AOI, potvrdila, že sekvenční schémata jsou na stejné úrovni prostorové vzdálenosti hůře čitelné, než kvalitativní. To bylo zjištěno již vyhodnocením předchozího experimentu *Schemes*.

Zkoumáním vzájemného působení barevné i prostorové vzdálenosti bylo zjištěno, že pro sekvenční stupnice je vhodné používat pouze nejvyšší testovanou hodnotu barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 10$, při které správnost odpovědí není ovlivněna vzájemnou prostorovou vzdáleností dvou areálů. Ze stejných důvodů je pro odlišení kategorií kvalitativních stupnic doporučeno používat barevnou vzdálenost $\Delta E_{00} = 8$ a $\Delta E_{00} = 10$.

Před samotným provedením experimentu bylo rozhodnuto, že v ET části nebude zkoumána nejmenší prostorová vzdálenost ($\Delta d = 1$) z důvodu nepřesnosti použitého snímacího zařízení, která by znemožnila důkladnou analýzu prostorové složky naměřených dat v rámci specifikovaných AOI. Toto rozhodnutí nebylo zcela správné. i přes nemožnost analýzy přesunů mezi AOI by eye-tracking data mohla být využita alespoň pro vyhodnocení eye-tracking metrik, u kterých prostorová nepřesnost není podstatná.

5.4 Order: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

Mezi dva nejběžnější úkoly na mapách provedených metodou kartogramu a kvalitativních plošných znaků patří porovnání barevného provedení areálů s účelem posoudit jejich vzájemné kvalitativní, nebo kvantitativní odlišnosti, a porovnání barevnosti areálu s položkou v legendě pro identifikaci jeho významu.

V předchozích studiích *Schemes* (5.2) a *Euclid* (5.3) byla barevná vzdálenost zkoumána z hlediska první úlohy. V tomto experimentu *Order* je stejná problematika hodnocena prostřednictvím druhé úlohy, ale jen pro sekvenční barevná schémata (dále stupnice).

Jak bylo dokázáno, míra barevné vzdálenosti mezi dvěma/třemi areály na mapě má vliv na schopnost uživatelů porovnat a odlišit jejich kvantitu a kvalitu, která je v mapě prezentovaná příslušným odstínem barevných schémat. Zároveň již bylo zjištěno, že rozlišitelnost symbolů na základě barev je ovlivněna i jejich vzájemnou vzdáleností na mapovém listu.

Protože rozdílnost mezi uvedenými úlohami na mapách nebyla ve světové literatuře doposud popsána, motivací pro tento výzkum byl čistě explorativní přístup k problému. Cílem experimentu bylo vyzkoumat vliv barevné vzdálenosti na schopnost uživatele přiřadit označenému areálu v mapě správnou hodnotu z legendy. Vzhledem k tomu, že umístění hlavních kompozičních prvků mapy (včetně legendy) může ovlivnit celkovou čitelnost mapy (Brychtová et al., 2012b; Slocum et al., 2008), bylo mezi studované nezávislé proměnné zařazeno i umístění legendy na mapovém listu.

5.4.1 Metody

Cílem experimentu *Order* bylo zjistit vliv *barevné vzdálenosti* mezi intervaly sekvenčních barevných stupnic na schopnost uživatelů přiřadit vybranému areálu na mapě správný interval legendy. Zároveň byl sledován vliv *umístění legendy* na mapovém listu.

Při experimentu byl sledován vliv tří nezávislých proměnných: *barevné vzdálenosti*, *pořadí intervalů v legendě* a *umístění legendy* na průběh pěti závislých proměnných: *správnosti odpovědí* a *času* potřebného k jejich nalezení.

Účastníci experimentu

Experimentu se zúčastnilo 35 dobrovolníků ve věku 19-35 let. Struktura účastníků podle pohlaví byla 19 mužů a 16 žen; podle zkušeností v oblasti kartografie a GIS 18 expertů a 17 začátečníků. Na základě testu barevného vidění pseudoisochromatickými tabulkami nebyla u žádného účastníka zjištěna porucha barevného vidění.

Design a průběh experimentu

Účastníci experimentu byli vystaveni všem testovaným podmínkám (tzv. within-subject design). Pořadí stimulů bylo náhodné a unikátní pro každého účastníka. Časový limit pro vyřešení úkolu nebyl stanoven.

Úkolem pro respondenty bylo najít na mapě areál označený tečkou a přiřadit mu správný interval v legendě. Místo pro označení správné odpovědi bylo zobrazeno mimo experimentální stimulus. Respondent jej vyvolal stisknutím mezerníku.

Experiment proběhl v kontrolovaných podmínkách eye-tracking laboratoře Katedry geoinformatiky, Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž technické parametry jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.

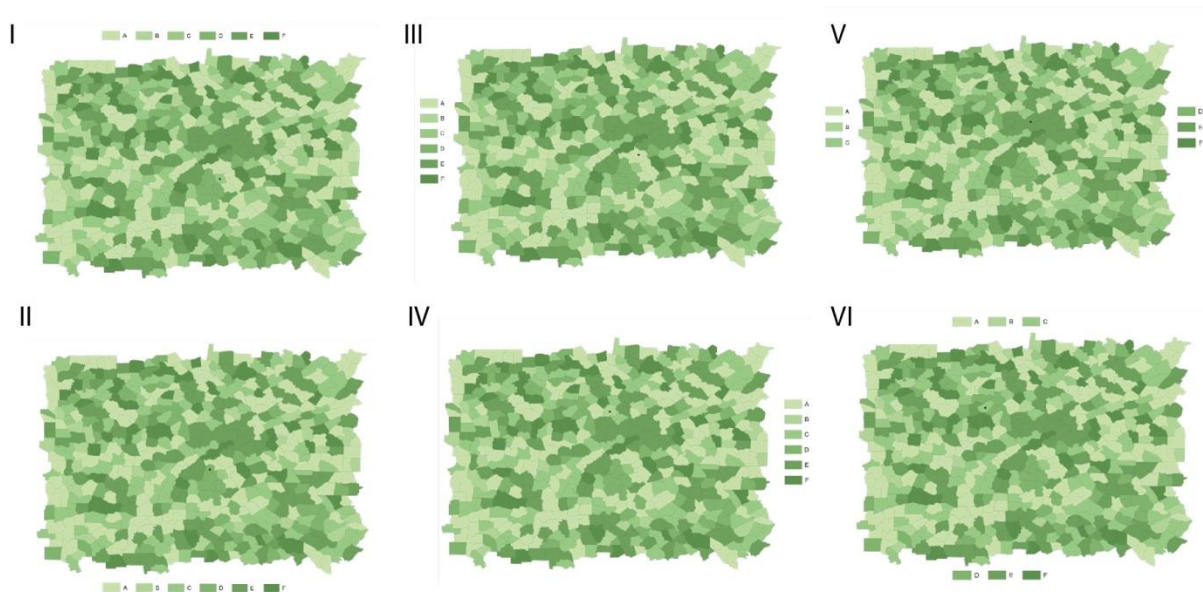
Stimuly

Bylo hodnoceno 5 sekvenčních barevných stupnic o šesti intervalech (označeny písmeny A–F od nejsvětějšího po nejtmavší) v odstínech zelené barvy. Barevná vzdálenost mezi intervaly byla v rámci stupnic uniformní a odpovídala hodnotám $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ nebo 10 . Barevnost testovaných stupnic je stejná, jako v experimentech *Schemes* (5.2) a *Euclid* (5.3) a jejich specifikace je uvedena v tabulce 8a na straně 65.

Jeden z areálů obsahově i geometricky zjednodušené mapy byl označen tečkou a obarven odstínem konkrétního intervalu A–F jedné z testovaných stupnic. Úkolem pro respondenta bylo tomuto areálu přiřadit správný interval z legendy, která mohla být vůči mapovému poli umístěna nahoře, dole, vlevo, vpravo či vertikálně nebo horizontálně rozdělená (obr. 56, příloha 5 a 8). Označený areál byl umístěn pokaždé přibližně ve středu stimulu, aby jeho vzdálenost od legendy byla přibližně stejná.

Ostatní (neoznačené) areály mapy byly obarveny odstíny intervalů příslušné stupnice náhodně, aby byl co nejvíce zamezen (nebo rozptýlen) nežádoucí efekt simultánního kontrastu.

Z celkového počtu 180 možných kombinací podmínek (5 sekvenčních stupnic \times 6 intervalů \times 6 umístění legend) bylo systematicky vybráno 40, aby všechny testované proměnné měly dostatečný počet stimulů a aby zároveň experiment nebyl neúnosně dlouhý.



Obrázek 56. Ukázka stimulů s různým umístěním legendy: (I) nahoře, (II) dole, (III) vlevo, (IV) vpravo, (V) vertikálně rozdělená, (VI) horizontálně rozdělená.

5.4.2 Výsledky

Výsledky experimentu *Order* byly založeny na analýze správnosti odpovědí a času do jejich nalezení. Hlavními hypotézami studie bylo:

(H1) Větší barevná vzdálenost způsobuje vyšší správnost a kratší čas odpovědí respondentů.

(H2) Výkon respondentů není ovlivněn pořadím intervalu (A-F) v barevné stupnici.

(H3) Horizontálně či vertikálně rozdělená legenda vede k horším výsledkům než ostatní testované varianty.

Správnost odpovědí

Správnost odpovědí byla nejprve analyzovaná zvláště podle barevné vzdálenosti mezi intervaly stupnic, pořadí intervalů ve stupnicích a umístění legendy.

Z výsledků je patrné, že barevná vzdálenost ovlivňuje správnost odpovědí zcela podle hypotézy H1. Nejnižší správnost odpovědí (54 %) byla zjištěna u $\Delta E_{00} = 2$ a s rostoucí barevnou vzdáleností konzistentně stoupá i správnost odpovědí (obr. 57a), nejvyšší správnost (82 %) byla u $\Delta E_{00} = 10$. Závislost správnosti odpovědí na barevné vzdálenosti byla potvrzena i chí-kvadrát testem ($\chi^2 = 59,38$; $df = 4$, $p = 0,00$).

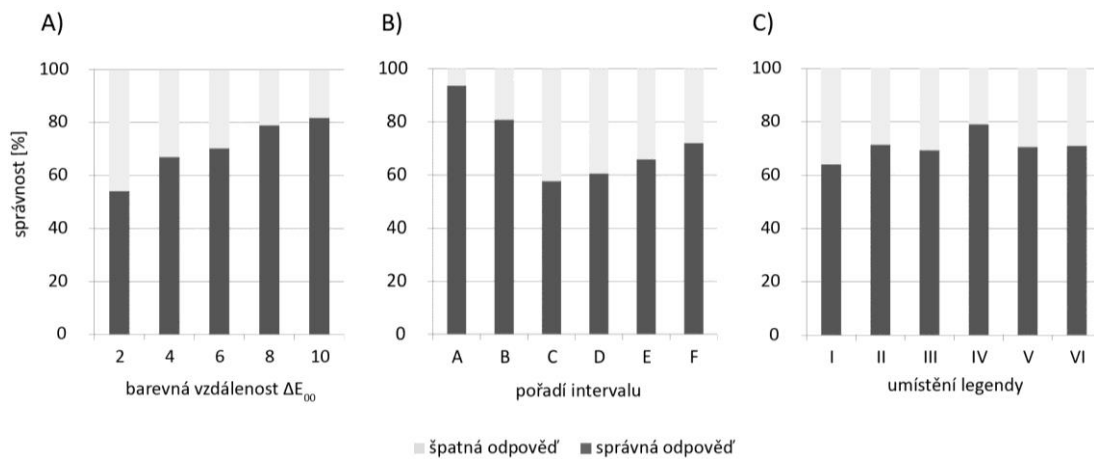
Při srovnání správnosti odpovědí z experimentů *Schemes* a *Euclid* byla navíc zjištěna závislost na typu úlohy: u všech testovaných hodnot ΔE_{00} sekvenčních stupnic byla správnost porovnání dvou areálů na mapě (obr. 38 na str. 67) všeobecně mnohem vyšší (průměrně zhruba o 20 %) než při přiřazování hodnoty z legendy.

Vzhledem k vzdálenosti označeného areálu od legendy by vyšší obtížnost mohla být způsobena prostorovou vzdáleností, jejíž vliv byl potvrzen experimentem *Euclid* (podkapitola 0). Výsledky pro největší vzdálenost $\Delta d = 3$ (obr. 54a na str. 83), která je srovnatelná se vzdáleností areál-legenda v této studii, ukazují mnohem vyšší správnost (u $\Delta E_{00} = 2$ o zhruba 10 % a u $\Delta E_{00} = 10$ o 12 %) a proto lze všeobecně nižší správnost odpovědí dát za vinu typu úlohy.

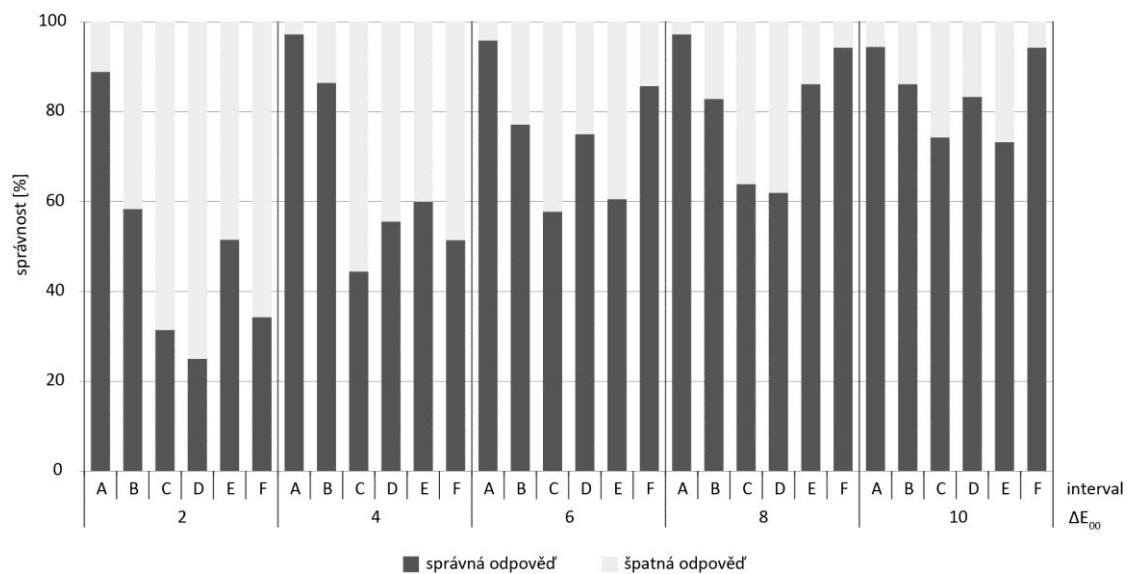
V rozporu s hypotézou H2 bylo zjištěno, že na správnost odpovědí má velký vliv pořadí určovaného intervalu A-F ($\chi^2 = 97,87$; $df = 5$, $p = 0,00$). Bez ohledu na barevnou vzdálenost a typ legendy bylo nejméně problematické správně určit nejsvětější odstíny barevných stupnic (A a B, správnost 94 % resp. 80 %), zatímco nejméně správně byly určeny prostřední odstíny (C a D, správnost 58 % resp. 60 %). Správnost určení nejtmašších odstínů (E a F) byla opět vyšší (65 %, resp. 71 %) (obr. 57b).

V dalším kroku byla zkoumána souvislost mezi barevnou vzdáleností intervalů a jejich pořadím (obr. 58). Bylo potvrzeno, že porovnání nejsvětějšího odstínu (A) není pro respondenty obtížné u žádné z testovaných hodnot ΔE_{00} . U vyšších barevných vzdáleností $\Delta E_{00} = 6$, 8 a 10 byl druhým nejlépe identifikovatelným intervalem ten nejtmašší (F), zatímco prostřední intervaly (B, C, D, E) činily výrazně větší obtíže. U nižších barevných vzdáleností $\Delta E_{00} = 2$ a 4 patřil nejtmašší interval (F) k problematickým.

Předpokládaný vliv umístění legendy na mapovém listu na správnost map (hypotéza H3) nebyl potvrzen (obr. 57c). Jedinou odchylkou od zjištěných hodnot byla signifikantně vyšší správnost (79 %) odpovědí u umístění IV - vpravo (výsledky chí-kvadrát testu dobré shody se zahrnutím varianty IV: $\chi^2 = 12,12$; $df = 5$, $p = 0,03$; bez varianty IV: $\chi^2 = 3,86$; $df = 4$, $p = 0,42$).



Obrázek 57. Správnost odpovědí podle (A) barevné vzdálenosti mezi intervaly, (B) pořadí intervalů ve stupnicích a (C) umístění legendy.



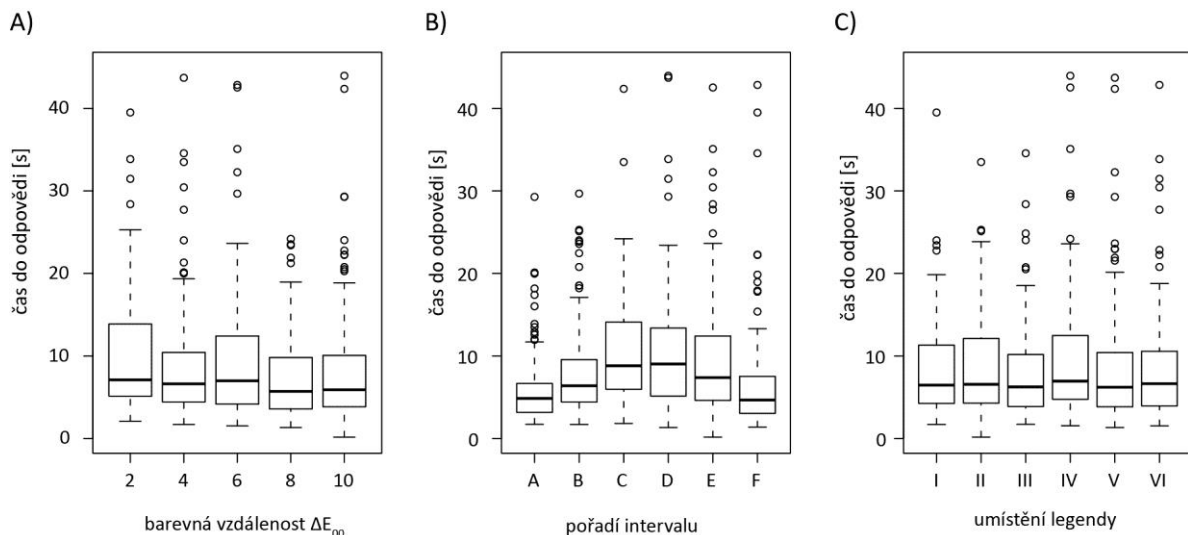
Obrázek 58. Správnost odpovědí podle barevné vzdálenosti v souvislosti s pořadím intervalů.

Čas do odpovědi

Analýzou času do nalezení správné odpovědi nebyl oproti hypotéze (H1) zjištěn vliv barevné vzdálenosti na efektivitu respondentů (obr. 59a). Jediná signifikantní odlišnost byla zjištěna mezi $\Delta E_{00} = 2$ a $\Delta E_{00} = 8$.

Vliv pořadí určovaných intervalů A–F na schopnost respondentů správně odvodit hodnotu intervalu z legendy byl potvrzen i časem, který byl pro tento úkol zapotřebí ($H = 83,01$; $df = 5$; $p = 0,00$). Časová náročnost úkolu byla mnohem nižší u extrémních intervalů (A: $Mdn = 4,86$ s; F: $Mdn = 4,66$ s) než u prostředních intervalů (C: $Mdn = 8,83$ s; D: $Mdn = 9,03$ s).

Vliv umístění legendy na mapovém poli nebyl potvrzen ($H = 3,16$; $df = 5$; $p = 0,68$; obr. 59c).



Obrázek 59. Čas do nalezení správné odpovědi podle (A) barevné vzdálenosti mezi intervaly, (B) pořadí intervalů ve stupnicích a (C) umístění legendy.

5.4.3 Závěr

V rámci experimentu *Order* bylo znovu potvrzeno, že rostoucí barevná vzdálenost má konzistentní vliv na zlepšení výkonu při řešení úlohy s mapou. Bylo však zjištěno, že schopnost uživatelů zjistit správnou odpověď na téže mapě je značně ovlivněno typem úlohy: srovnání barevnosti dvou areálů je mnohem jednodušší než určenému areálu najít odpovídající interval v legendě. Protože není možné předpovědět, k jakému účelu bude mapa používána, je třeba její vzhled optimalizovat ideálně pro oba typy úloh.

Významným zjištěním bylo, že na správnost odpovědí mělo významný vliv pořadí intervalů v barevné stupnici. Nejsvětlejší (A) a nejtmaší (F) intervaly bylo snazší spojit s odpovídající položkou v legendě, zatímco prostřední intervaly činily více obtíží. Na základě tohoto výsledku lze tvrdit, že testované nastavení sekvenčních barevných stupnic s uniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly není optimální. Lze předpokládat, že výraznější vizuální odlišení prostředních intervalů oproti okrajovým, přinese lepší výsledky.

Součástí studie bylo i testování umístění legendy na mapovém listu. Signifikantně nejlepší variantou bylo umístění vpravo od mapového listu; rozdíly mezi ostatními možnostmi se nepotvrdily. Tento výsledek lze vysvětlit tím, že účastníci experimentu byly z velké části studenty Katedry geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci, kteří jsou zvyklí ze svých kartografických cvičení umísťovat legendu do pravé části mapového listu.

5.5 Optimization: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic

V předchozích experimentech *Schemes* (podkapitola 5.2) a *Order* (podkapitola 5.4) byly prostřednictvím dvou běžných úloh s kartogramy hodnoceny sekvenční stupnice, jejichž intervaly byly odlišeny uniformní hodnotou barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ nebo 10. Barevná vzdálenost byla prokázána jako významný faktor ovlivňující schopnost respondentů vyřešit zadanou úlohu. Vyšší hodnoty barevné vzdálenosti umožnily lepší rozlišitelnost dvou areálů i snadnější přiřazení hodnot z legendy areálům v mapě. Významným zjištěním bylo, že na správnost odpovědí mělo vliv pořadí intervalů v barevné stupnici. Nejsvětlejší a nejtmaší odstíny bylo snazší spojit s odpovídajícím intervalem v legendě, zatímco prostřední odstíny činily více obtíží. Na základě tohoto výsledku byly vytvořeny a otestovány nové sekvenční stupnice s neuniformním rozložením barevných vzdáleností mezi intervaly s cílem zvýšit schopnost uživatelů map správně určit barvy všech intervalů.

5.5.1 Metody

Cílem experimentu *Optimization* bylo navrhnout a ověřit účinnost nových sekvenčních stupnic s neuniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly.

Pro ověření byl sledován vliv dvou nezávislých proměnných: *rozložení barevné vzdálenosti* v rámci stupnice a *pořadí intervalů* ve stupnici na průběhu jediné závislé proměnné: *správnost* odpovědí. Další závislé proměnné nebyly v této studii hodnoceny, protože jejich analýzou byly pouze potvrzeny závěry plynoucí z analýzy správnosti odpovědí a studovaná problematika nebyla více vysvětlena (Brychtová, 2014a).

Účastníci experimentu

Experimentu se zúčastnilo 35 dobrovolníků ve věku 19-35 let. Struktura účastníků podle pohlaví byla 19 mužů a 16 žen; podle zkušeností v oblasti kartografie a GIS 18 expertů a 17 začátečníků. Na základě testu barevného vidění pseudoisochromatickými tabulkami nebyl žádný účastník postižen poruchou barevného vidění.

Design a průběh experimentu

Účastníci studie byli vystaveni všem testovaným podmínkám (tzv. within-subject design). Pořadí stimulů bylo náhodné a unikátní pro každého účastníka. Časový limit pro vyřešení úkolu nebyl stanoven. Úkolem pro respondenty bylo najít na mapě areál označený tečkou a přiřadit mu správný interval v legendě.

Experiment proběhl v kontrolovaných podmínkách eye-tracking laboratoře Katedry geoinformatiky, Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž technické parametry jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.

Stimuly

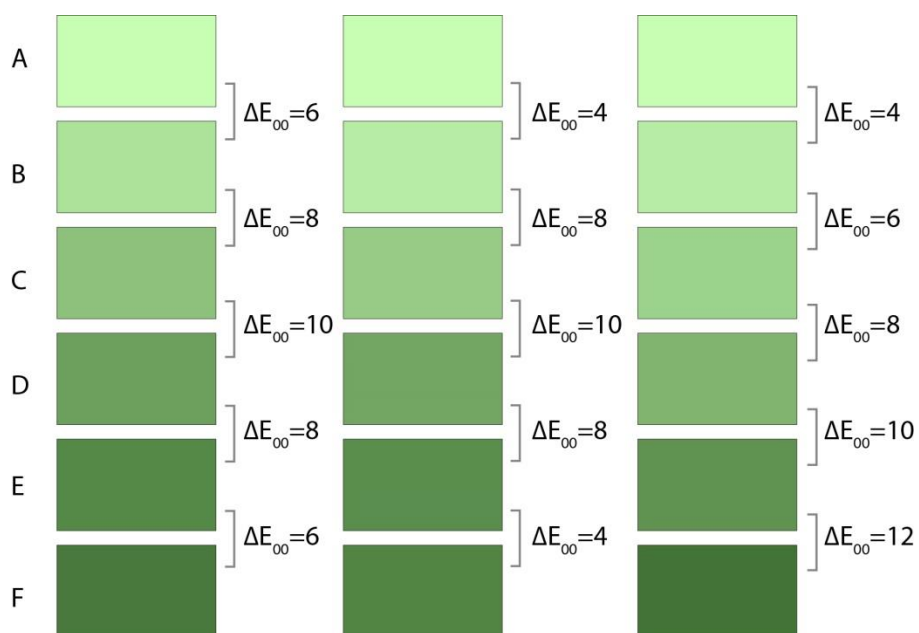
Pro účely testování byly vytvořeny tři nové sekvenční barevné stupnice se šesti intervaly (A–F) v odstínech zelené barvy. Parametry nových stupnic byly zvoleny na základě závěru studie *Order* (podkapitola 5.4), že uniformní barevná vzdálenost mezi intervaly stupnic způsobuje horší odlišitelnost odstínů prostředních intervalů. V nových stupnicích byly prostřední intervaly odlišeny větší barevnou vzdáleností: 4-8-10-8-4, 6-8-10-8-6 a 4-6-8-10-12 (čísla odpovídají hodnotám ΔE_{00} mezi jednotlivými intervaly.) Specifikace a náhled barevnosti nových stupnic je uveden v tabulce 16 resp. na obrázku 60.

Legenda byla na všech stimulech umístěna vpravo. Ostatní specifika stimulů byla stejná, jako v předchozích studiích. Stimuly představovaly mapy fiktivního území s areály o přibližně stejné velikosti. Areály mapy byly obarveny odstíny příslušné stupnice náhodně, aby byl co nejvíce zamezen (nebo rozptýlen) nežádoucí efekt simultánního kontrastu.

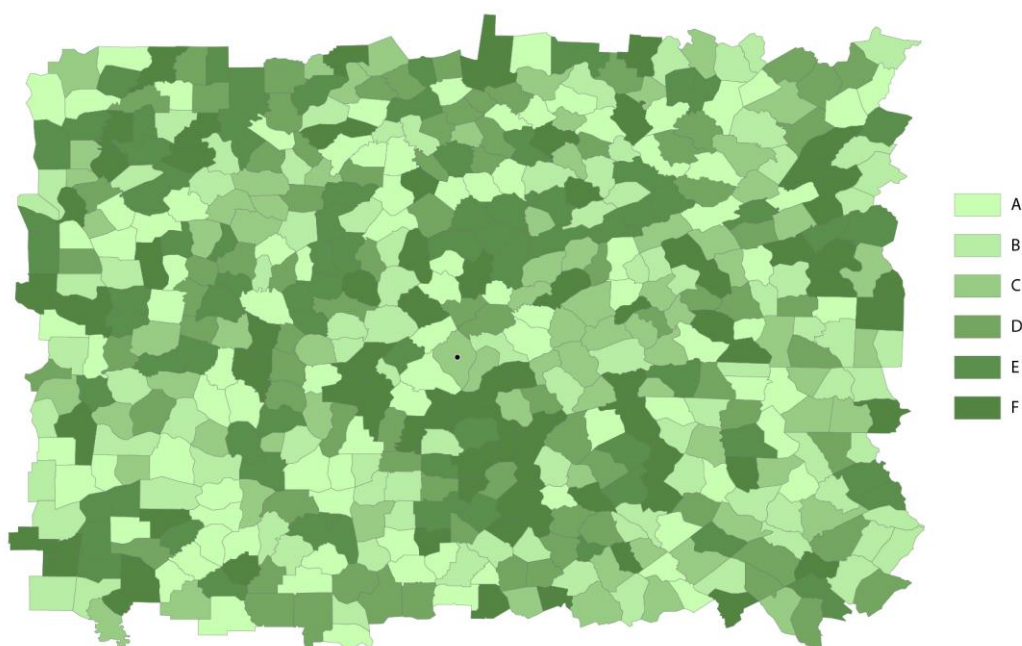
Do studie bylo zařazeno celkem 18 stimulů se všemi možnými testovanými variantami (3 varianty barevných stupnic po 6 intervalech A–F). Na každém stimulu byl tečkou označen jeden areál obarvený odstínem příslušného intervalu z testované stupnice, jehož hodnotu měl participant za úkol vyčíst z legendy. Ukázka experimentálního stimulu je na obrázku 61, v příloze 6 a 8.

Tabulka 16. Specifikace testovaných barevných stupnic s neuniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly.

stupnice	interval	L	a	b	R	G	B
4 - 8 - 10 - 8 - 4	A	94,80	-30,00	30,00	201	255	179
	B	88,32	-30,00	30,00	183	236	162
	C	76,47	-30,00	30,00	150	203	131
	D	63,54	-30,00	30,00	116	167	98
	E	54,57	-30,00	30,00	93	143	76
	F	50,50	-30,00	30,00	82	132	66
6 - 8 - 10 - 8 - 6	A	94,80	-30,00	30,00	201	255	179
	B	85,22	-30,00	30,00	174	227	153
	C	73,72	-30,00	30,00	143	195	123
	D	61,18	-30,00	30,00	110	161	92
	E	52,49	-30,00	30,00	87	138	71
	F	46,48	-30,00	30,00	72	122	57
4 - 6 - 8 - 10 - 12	A	94,80	-30,00	30,00	201	255	179
	B	88,32	-30,00	30,00	183	236	162
	C	79,31	-30,00	30,00	158	211	138
	D	68,49	-30,00	30,00	129	180	110
	E	56,71	-30,00	30,00	98	149	81
	F	44,69	-30,00	30,00	68	118	53



Obrázek 60. Náhled barevnosti optimalizovaných sekvenčních stupnic.



Obrázek 61. Ukázka experimentálního stimulu (barevná stupnice 6-8-10-8-6, tečkou je označen interval C).

5.5.2 Výsledky

Výsledky experimentu byly založeny na analýze správnosti odpovědí. Jedinou hypotézou studie bylo:

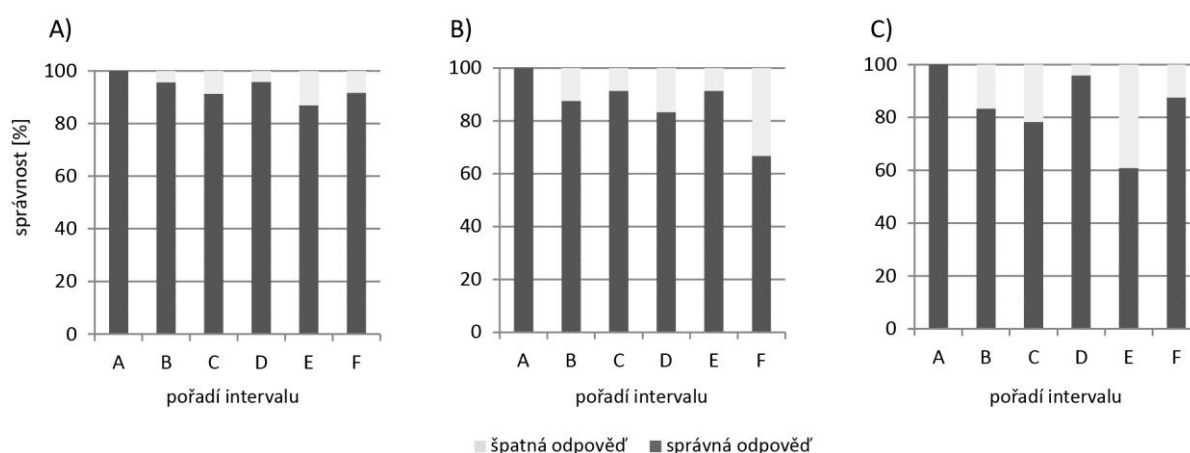
(H1) Nově navržené sekvenční stupnice s neuniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly zvýší správnost odpovědí v porovnání se sekvenční stupnice s uniformní barevnou vzdáleností.

Správnost odpovědí byla hodnocena zvlášť pro každou ze tří navržených barevných stupnic (4-8-10-8-4; 6-8-10-8-6 a 4-6-8-10-12) a každý z šesti intervalů.

Jednoznačně nejlepší výsledky měli uživatelé při řešení úkolu s barevnou stupnicí 4-8-10-8-4 (obr. 62a). Bez ohledu na pořadí intervalů byla správnost odpovědí 94 %. Nejmenší úspěšnost byla u předposledního intervalu (E, 87% správnost). Chí-kvadrát test ale potvrdil, že v případě této stupnice nemá na správnost výsledků vliv přiřazený interval ($\chi^2 = 3,96$, $df = 5$, $p = 0,55$).

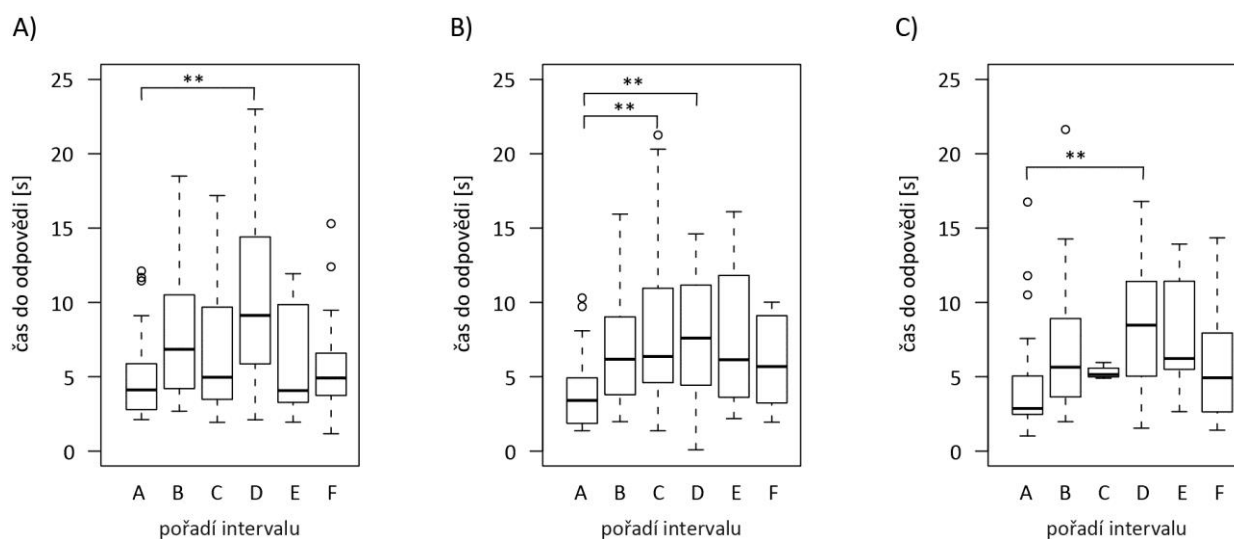
Celková správnost u stupnice 6-8-10-8-6 byla 87 % (obr. 62b). V tomto případě bylo výrazně nejobtížnější správně identifikovat nejtmaší interval (F, 67% správnost); na ostatních úkolech se vliv pořadí intervalu neprojevil (bez intervalu F: $\chi^2 = 4,17$, $df = 4$, $p = 0,38$; s intervalem F: $\chi^2 = 12,82$, $df = 5$, $p = 0,02$).

Zcela nejhorší výsledky způsobila barevná stupnice 4-6-8-10-12 s celkovou správností odpovědí 84 % (obr. 62c). Správnost je evidentně závislá na intervalu ($\chi^2 = 17,16$, $df = 5$, $p = 0,00$), ale nelze vypořádat žádnou určitou tendenci dat. Nejobtížnější bylo správně určit interval E (61% správnost).



Obrázek 62. Správnost odpovědí sledovaná u barevných stupnic (A) 4-8-10-8-4, (B) 6-8-10-8-6 a (C) 4-6-8-10-12.

Analýzou celkového času do nalezení správné odpovědi nebyla mezi testovanými stupnicemi zjištěna signifikantní odlišnost ($H = 0,17$; $df = 2$; $p = 0,92$). V rámci jednotlivých stupnic se projevilo několik signifikantních odlišností na základě času do odpovědi mezi konkrétními intervaly (obr. 63).



Obrázek 63. Čas do správných odpovědí sledovaný u barevných stupnic (A) 4-8-10-8-4, (B) 6-8-10-8-6 a (C) 4-6-8-10-12.

5.5.3 Závěr

Všechny stupnice s neuniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly představují oproti všem stupnicím s uniformní barevnou vzdáleností značné zlepšení. Celková správnost sledovaná u optimalizovaných stupnic je vyšší než u stupnic s uniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly (tab. 17). Avšak pouze stupnice 4-8-10-8-4 způsobila konzistentní a uspokojivé výsledky.

Mezi optimalizovanými stupnicemi nebyl na základě analýzy času do správné odpovědi zjištěn žádný rozdíl, ale jejich mediánové časy do nalezení správné odpovědi byly rychlejší než 3 z 5 původních stupnic (tab. 17).

Tabulka 17. Celková správnost odpovědi a mediánový čas do nalezení správné odpovědi pro barevné stupnice s uniformní barevnou vzdáleností mezi intervaly (2, 4, 6, 8 a 10) a optimalizované barevné stupnice (4-8-10-8-4, 6-8-10-8-6 a 4-6-8-10-12).

Barevná stupnice	Celková správnost odpovědi [%]	Mediánový čas do odpovědi [s]
2	54	7,10
4	68	6,61
6	71	6,99
8	79	5,71
10	82	5,91
4-8-10-8-4	94	5,14
6-8-10-8-6	87	5,97
4-6-8-10-12	84	5,57

5.6 Hue: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

Lidské oko je citlivé na světlo o vlnových délkách v přibližném rozsahu 400–700 nm, kterému se říká viditelné spektrum (Fairchild, 2005). Citlivost na různé části viditelného spektra však kolísá. Například při denním světle je oko nejcitlivější na oblast zelené (zhruba 555 nm). Tento poznatek reflektuje například i zobrazení barevného prostoru sRGB v referenčním barevném prostoru CIELAB (podkapitola 3.5). Čím vzdálenější je určitá barva v tomto modelu od bílé, tím více lze vytvořit odstínů o stanovené barevné vzdálenosti.

Výzkum Gilmartina a Sheltona (1989) proměnlivou citlivost na různé části spektra potvrdil i na kartografickém příkladu. Dokázali, že odpovědi uživatelů byly správnější a rychlejší na mapách se zelenými sekvenčními stupnicemi než s fialovými, ačkoli rozdíl jasu nejsvětlejší a nejtmaší barvy byl větší u fialové stupnice a teoreticky by měla být pro použití na mapách lepší. Bohužel jejich studie postrádá konkrétní specifikaci testovaných barev, a proto nelze prověřit, jaká byla faktická vnímaná barevná vzdálenost mezi testovanými barevnými odstíny.

Cílem posledního experimentu *Hue* bylo ověřit, že správným nastavením hodnot barevné vzdálenosti lze dosáhnout stejně uspokojivých výsledků při konstrukci sekvenčních stupnic bez ohledu na jejich hlavní barevný tón. Použitá metoda výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000 je založena na poznacích o lidském vnímání světla a dokáže tedy popsat vnímaný rozdíl i přes proměnlivou citlivost v různých částech spektra.

5.6.1 Metody

Cílem experimentu *Hue* bylo ověřit, že schopnost účastníků studie vyřešit zadaný úkol není ovlivněna tónem sekvenčních stupnic se shodným nastavením barevné vzdálenosti mezi jejich intervaly.

Pro ověření hypotézy byl sledován vliv jediné nezávislé proměnné: *tón* sekvenčních stupnic na *správnosti odpovědí*. Další závislé proměnné nebyly v této studii hodnoceny, protože jejich analýzou byly pouze potvrzeny závěry plynoucí z analýzy správnosti odpovědí a studovaná problematika nebyla více vysvětlena (Brychtová, 2014a).

Data pro studii byla získána zároveň s experimentem *Optimization* (podkapitola 5.5), ale výsledky byly hodnoceny zvlášť.

Účastníci experimentu

Experimentu se zúčastnilo 35 dobrovolníků ve věku 19–35 let. Struktura účastníků podle pohlaví byla 19 mužů a 16 žen; podle zkušeností v oblasti kartografie a GIS 18 expertů a 17 začátečníků. Na základě testu barevného vidění pseudoisochromatickými tabulkami nebyl žádný účastník postižen poruchou barevného vidění.

Design a průběh experimentu

Účastníci studie byli vystaveni všem testovaným podmínkám (tzv. within-subject design). Pořadí stimulů bylo náhodné a unikátní pro každého účastníka. Časový limit pro vyřešení úkolu nebyl stanoven.

Úkolem pro respondenty bylo najít na mapě areál označený tečkou a přiřadit mu správný interval v legendě.

Experiment proběhl v kontrolovaných podmínkách eye-tracking laboratoře Katedry geoinformatiky, Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž technické parametry jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.

Stimuly

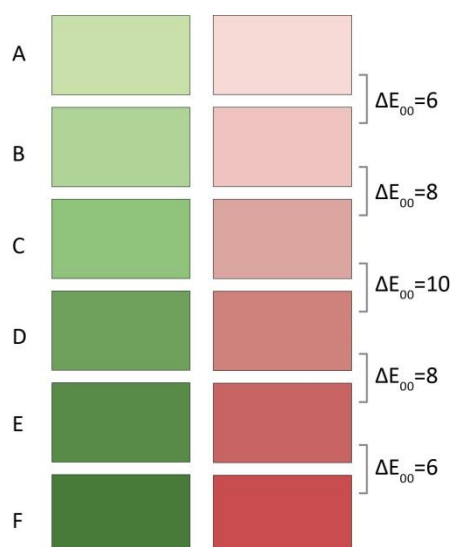
V experimentu *Hue* byly testovány dvě sekvenční barevné stupnice se šesti intervaly (A–F) v odstínech zelené a červené barvy, jejichž intervaly byly odlišeny barevnou vzdáleností ΔE_{00} 6-8-10-8-6. Specifikace a náhled barevnosti stupnic je v tabulce 18 resp. na obrázku 64. Zelená stupnice byla použita i v předchozím experimentu *Optimization* (podkapitola 5.5). Červená stupnice byla vytvořena bez znalostí výsledků předchozí studie, protože byla kvůli omezeným časovým kapacitám testována v jejím průběhu.

Legenda byla na všech stimulech umístěna vpravo. Ostatní specifika stimulů byla stejná, jako v předchozích studiích. Stimuly představovaly mapy fiktivního území s areály o přibližně stejné velikosti. Areály mapy byly obarveny odstíny příslušné stupnice náhodně, aby byl co nejvíce zamezen (nebo rozptýlen) nežádoucí efekt simultánního kontrastu.

Do studie bylo zařazeno celkem 12 stimulů se všemi možnými testovanými variantami (2 varianty barevných stupnic po 6 intervalů A–F). Na každém stimulu byl tečkou označen jeden areál obarvený odstínem příslušného intervalu z testované stupnice, jehož hodnotu měl participant za úkol vyčíst z legendy. Ukázka experimentálního stimulu je na obrázku 61, v příloze 7 a 8.

Tabulka 18. Specifikace testované červené a zelené barevné stupnice.

	interval	L	a	b	R	G	B
červená stupnice	A	89,23	10,00	4,90	247	218	214
	B	82,50	15,00	7,35	239	195	191
	C	72,28	20,00	9,80	219	164	159
	D	61,56	30,00	14,70	206	128	123
	E	53,97	40,00	19,60	200	99	97
	F	49,15	50,61	24,82	200	74	77
zelená stupnice	A	94,80	-30,00	30,00	201	255	179
	B	85,22	-30,00	30,00	174	227	153
	C	73,72	-30,00	30,00	143	195	123
	D	61,18	-30,00	30,00	110	161	92
	E	52,49	-30,00	30,00	87	138	71
	F	46,48	-30,00	30,00	72	122	57



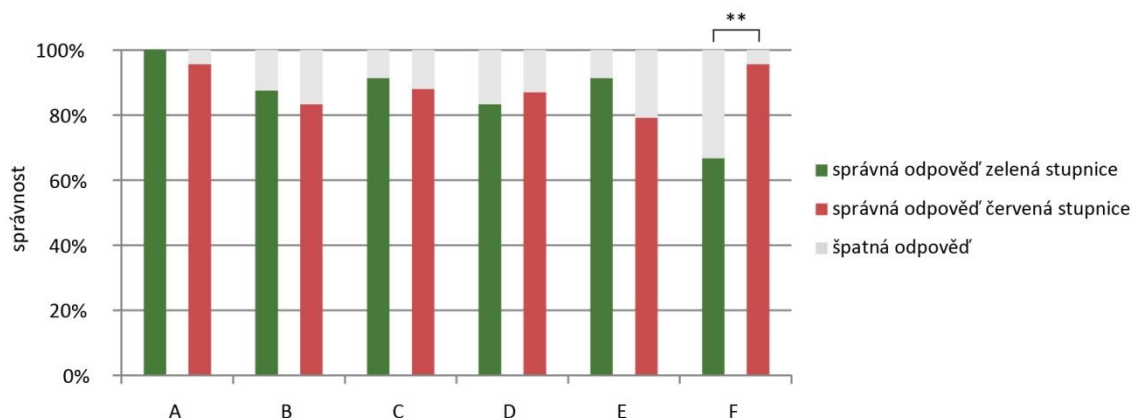
Obrázek 64. Náhled barevnosti testovaných sekvenčních stupnic.

5.6.2 Výsledky

Výsledky experimentu byly založeny na analýze správnosti a času odpovědí. Jedinou hypotézou studie bylo:

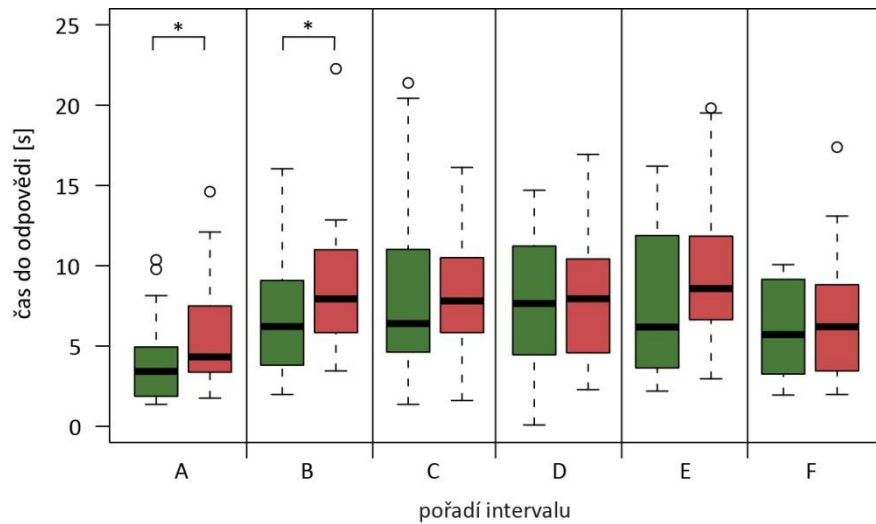
(H1) Uživatelé dosahují stejného výkonu při použití zelené i červené stupnice.

Celková správnost odpovědí byla 87 % pro zelenou a 87 % pro červenou sekvenční stupnici. Porovnáním správnosti pro každý interval zvlášť byla zjištěna jediná signifikantní rozdílnost mezi zelenou a červenou u nejtmašího intervalu F ($\chi^2 = 6,37$, $df = 1$, $p = 0,01$). U ostatních intervalů se vliv tónu barevné stupnice neprojevil.



Obrázek 65. Správnost odpovědí pro zelenou a červenou sekvenční stupnici.

Mann-Whitneyův test prokázal závislost času do správné odpovědi na tónu sekvenční stupnice pouze u nejsvětějších odstínů a a B (A: $U = 343,5$; $p = 0,04$; B: $U = 303,0$; $p = 0,02$). U ostatních intervalů stupnic se rozdíl v čase neprojevil.



Obrázek 66. Čas do odpovědi pro zelenou a červenou sekvenční stupnici.

5.6.3 Závěr

Hlavní hypotézou experimentu bylo, že tón sekvenční stupnice neovlivňuje výkon respondentů při řešení experimentální úlohy. Tento předpoklad nebyl potvrzen správností odpovědí u jednoho intervalu (F) a časem do odpovědi u dvou intervalů (A a B). Protože se tyto rozdíly projevily pouze u jedné z metrik, stanovanou hypotézu H1 lze potvrdit.

Výrazně nízká správnost u zelené stupnice v případě intervalu F a vyšší efektivita respondentů u téže stupnice a intervalů a a B mohla být způsobena konkrétním rozložením barev na stimulu. Pro každou z testovaných podmínek (tón stupnice a pořadí intervalu) byl vytvořen pouze jeden stimulus, a proto nelze s určitostí říct, čím byly odchylky od předpokladu způsobeny.

6 DC3-TVORBA NÁSTROJE PRO KONSTRUKCI BAREVNÝCH STUPNIC

Výsledky studie *Experiences* (podkapitola 4.1), která byla provedena v rámci DC1, ukázaly, že kartografové při konstrukci barevných schémat pro své mapy buď využívají existující vzorníky, které jsou součástí programů pro tvorbu map, nebo využívají vlastní barevná schémata. Existuje velké množství aplikací, které umožňují generovat barevné palety barev pro vytvoření poutavého vzhledu grafických výstupů. Jsou založeny na výběru analogických, monochromatických nebo komplementárních barev, jejichž kombinaci lze považovat za estetickou (například Adobe Color CC nebo Paletton.com). Zmíněné nástroje však neumožňují nastavit počet odstínů ani míru jejich vizuální odlišnosti. Dále existuje velké množství aplikací pro výpočet barevné vzdálenosti mezi dvěma barvami a pro konverzi mezi souřadnicemi různých barevných modelů a prostorů (například IRO Group Ltd., 2008; Lindbloom, 2012b). Ovšem žádná z uvedených aplikací není zcela vhodná pro tvorbu barevných schémat pro mapy.

Známým nástrojem pro tvorbu barevných schémat pro kartografické účely je ColorBrewer 2.0, který poskytuje specifikaci 18 sekvenčních, 9 divergentních a 8 kvalitativních schémat o 3–12 intervalech, resp. kategoriích. Neumožňuje však přizpůsobit nastavení stupnic konkrétním potřebám uživatele, což někteří z respondentů studie *Experiences* označili jako omezující, a proto ColorBrewer 2.0 používají pouze pro inspiraci.

Výsledky disertačního experimentálního výzkumu popsaného v DC2 ukázaly, že hodnota barevné vzdálenosti mezi intervaly, resp. kategoriemi barevných schémat má zásadní vliv na jejich rozlišitelnost, a tedy i na celkovou čitelnost mapy.

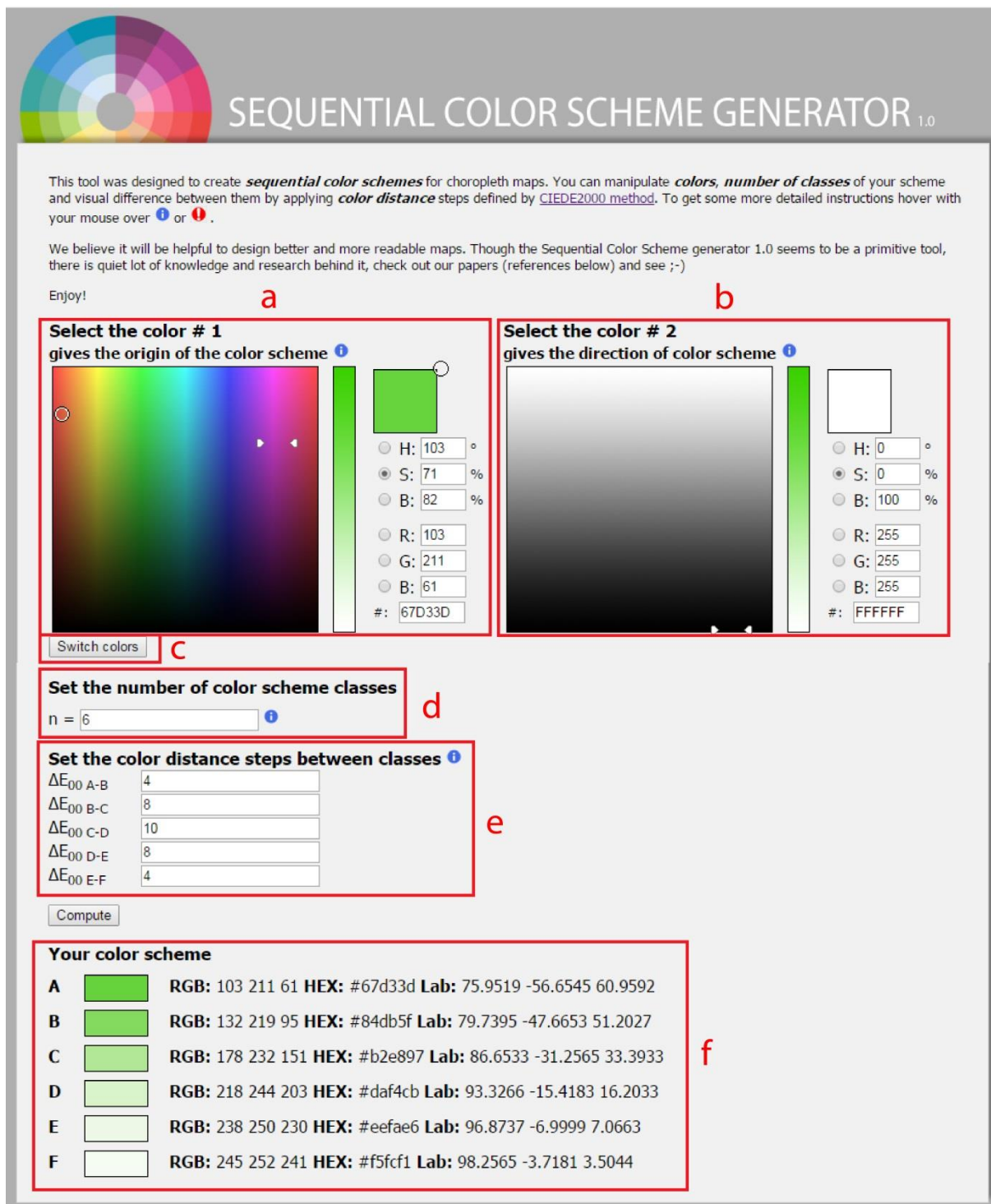
Cílem třetího, posledního dílčího cíle disertačního výzkumu bylo navrhnout a vytvořit nástroj pro konstrukci sekvenčních barevných schémat, který by umožnil uživatelské nastavení všech jejich důležitých parametrů, tj. barevnosti schématu, počet odstínů a barevné vzdálenosti mezi nimi. Snahou bylo sestavit doporučený postup pro používání tohoto nástroje při tvorbě digitálních a tištěných map

6.1 Nástroj Sequential Color Scheme Generator 1.0

Sequential Color Scheme Generator 1.0 je původní autorská webová aplikace, jejíž vznik byl motivován absencí nástroje pro tvorbu barevných schémat pro použití na mapách s možností uživatelského nastavení všech jejich parametrů, včetně barevné vzdálenosti, jejíž vliv na čitelnost map byl potvrzen výsledky disertačního výzkumu.

Nástroj je dostupný z adresy [bhttp://eyetracking.upol.cz/color/](http://eyetracking.upol.cz/color/) a slouží pro tvorbu sekvenčních barevných stupnic o uživatelsky stanovené barevnosti, počtu intervalů a barevné vzdálenosti počítané metodou CIEDE2000, která je určena vztahem[8] v podkapitole 3.4.

Uživatelské rozhraní nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0* (obr. 67) bylo vytvořeno s využitím CSS, PHP a JavaScript. Pro výběr barev byl implementován dialog vytvořený Dyerem (2007), který umožňuje specifikaci barev v souřadnicích HSB, RGB a HEX, nebo výběrem z palety. Náповěda k jednotlivým krokům a komentáře k chybovým výstupům se poskytuje prostřednictvím informačních oken, které se zobrazují při umístění kurzoru myši na příslušnou ikonu.



Obrázek 67. Uživatelské rozhraní nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0*
(<http://eyetracking.upol.cz/color/>)

Konstrukce sekvenčních stupnic pomocí *Sequential Color Scheme Generator 1.0* vyžaduje zadání čtyř údajů:⁷

1. počáteční barvu sekvenční stupnice A_1 (obr. 67a),
2. pomocnou barvu A_0 (obr. 67b), která udává směr, jímž se barevnost stupnice bude ubírat, nejedná se o poslední barvu stupnice, (počáteční a pomocnou barvu lze vyměnit pomocí přepínače (obr. 67c)),
3. počet intervalů stupnice n (obr. 67d),
4. $n - 1$ hodnot barevné vzdálenosti ΔE_{00} mezi barvami A_i a A_{i+1} , $\forall i \in \{1, \dots, n - 1\}$ (obr. 67e).

Po potvrzení zadání jsou vypočítány barvy intervalů stupnice A_i , $\forall i \in \{1, \dots, n - 1\}$ (v nástroji jsou pojmenovány písmeny A, B, C,...), je zobrazena jejich barevnost a specifikace v souřadnicích RGB, HEX a CIELAB (obr. 67f).

Počáteční barva A_1 (tedy A_i kde $i = 1$) je určena souřadnicemi CIELAB $[L_1, a_1, b_1]$, pomocná barva A_0 je určena souřadnicemi CIELAB $[L_0, a_0, b_0]$. Vektor $\mathbf{u} = \overrightarrow{A_1 A_0}$ určí směr konstrukce barevné stupnice v barevném prostoru CIELAB a platí pro něj $\mathbf{u}(u_1, u_2, u_3) = A_0 - A_1 = (L_0 - L_1, a_0 - a_1, b_0 - b_1)$. Jednotlivé barvy intervalů stupnice A_i , $\forall i \in \{1, \dots, n - 1\}$ jsou určeny souřadnicemi CIELAB $[L_i, a_i, b_i]$.

Barva A_{i+1} sekvenční stupnice v dané barevné vzdálenosti $\Delta E_{00}(A_i, A_{i+1})$ je pak určena vztahem [9]:

$$A_{i+1} = A_i + \mathbf{u}t_i, \forall i \in 1, \dots, n - 1 \quad [9]$$

kde platí

$$L_{i+1} = L_i + u_1 t_i,$$

$$a_{i+1} = a_i + u_2 t_i,$$

$$b_{i+1} = b_i + u_3 t_i,$$

$$t \in \mathbb{R}^+, \forall i \in \{1, \dots, n - 1\}.$$

Parametr t_i , $\forall i \in \{1, \dots, n - 1\}$, představuje poměr zadané vzdálenosti $\Delta E_{00}(A_i, A_{i+1})$ mezi barvami A_i a A_{i+1} a celkovou velikostí vektoru \mathbf{u} , kde $|\mathbf{u}| = \Delta E_{00}(A_1, A_0)$ a lze ho vypočítat dle soustavy [10] kdy je pro jeho výpočet využita metoda matematické analýzy *půlení intervalu*, protože parametr t_i nelze ze soustavy [10] vyjádřit.

⁷ Z důvodu uživatelské příjemnosti je označování vstupních parametrů v prostředí *Sequential Color Scheme Generator 1.0* odlišné od matematického zápisu postupu konstrukce sekvenčních stupnic.

$$C_{i,ab} = \sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2} \quad C_{i+1,ab} = \sqrt{(a_i + u_2 t_i)^2 + (b_i + u_3 t_i)^2} \quad [10]$$

$$\bar{C}_{ab} = \frac{C_{i,ab} + C_{i+1,ab}}{2}$$

$$G = 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^7}{\bar{C}_{ab}^7 + 25^7}} \right)$$

$$a'_i = (1 + G)a_i \quad a'_{i+1} = (1 + G)(a_i + u_2 t)$$

$$C'_i = \sqrt{(a'_i)^2 + (b_i)^2} \quad C'_{i+1} = \sqrt{(a'_{i+1})^2 + (b_2)^2}$$

$$h'_i = \text{atan} 2(b_i, a'_i) \text{ mod } 360^\circ \quad h'_{i+1} = \text{atan} 2(b_{i+1}, a'_{i+1}) \text{ mod } (h'_i - 180^\circ | h'_i + 180^\circ)$$

$$\text{kde } x \text{ mod } (a|b) = a + (x - a) \text{ mod } (b - a)$$

$$\Delta L' = -u_i t$$

$$\Delta C' = C'_{i+1} - C'_i$$

$$\Delta h' = h'_{i+1} - h'_i$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_i C'_{i+1}} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)$$

$$\bar{L}' = L_i + \frac{u_i t}{2}$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_i + C'_{i+1}}{2}$$

$$\bar{h}' = \frac{h'_i + h'_{i+1}}{2}$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,2 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$\Delta\theta = 30e^{-\left(\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right)^2}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0,0045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

$$\Delta E_{00}(A_i, A_{i+1}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)$$

kde

$$\text{atan} 2(y, x) = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), & y > 0, x \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + 180^\circ, & x < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + 360^\circ, & y > 0, x < 0 \\ 90^\circ, & y = 0, x > 0 \\ 270^\circ, & y = 0, x < 0 \\ 0^\circ, & y = 0, x = 0 \end{cases}$$

a $x \text{ mod } n = x - \left\lfloor \frac{x}{n} \right\rfloor \cdot n$, kde $\left\lfloor \frac{x}{m} \right\rfloor$ označuje celou dolní část hodnoty $\frac{x}{m}$, $m \in \mathbb{Z}$.

Barvy A_1 a A_0 , které uživatel definoval v souřadnicích RGB v rozsahu $R, G, B \in \langle 0; 255 \rangle$, HSB, hexadecimálním zápisem (HEX), nebo výběrem z barevné palety, vstupují do dalších výpočtů v hodnotách RGB převedených do rozsahu $R, G, B \in \langle 0; 1 \rangle$, a jsou považovány za souřadnice barev prostoru sRGB. Ty jsou dále převedeny na souřadnice CIELAB pomocí vztahů [6] (sRGB \rightarrow CIE 1931 XYZ) a [3] (CIE 1931 XYZ \rightarrow CIELAB) popsanych v podkapitole 3.3.3.

Pomocí hodnoty parametrů $t_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}$ jsou postupně vypočítány souřadnice všech barev sekvenční stupnice A_2, \dots, A_n v prostoru CIELAB, které jsou zpět převedeny do souřadnic prostoru sRGB pomocí vztahů [6] (CIELAB \rightarrow CIE 1931 XYZ) a [3] (CIE 1931 XYZ \rightarrow sRGB) popsanych v podkapitole 3.3.3.

Při konstrukci stupnic může nastat problém, že vypočtené souřadnice R, G a B výstupních barev A_2, \dots, A_n nejsou v rozsahu intervalu $\langle 0; 255 \rangle$ a tedy leží mimo barevný prostor sRGB. To může být způsobeno jedním ze dvou důvodů:

1. Uživatel zadal příliš velký počet intervalů a/nebo velkou barevnou vzdálenost mezi nimi a proto se barevnost intervalů dostala zcela mimo prostor sRGB. To je způsobeno neexistencí vzájemně jednoznačného zobrazení mezi barevnými prostory sRGB, ve kterém jsou definovány vstupní a výstupní barvy, a CIELAB, ve kterém probíhají výpočty barevné vzdálenosti (obr. 68).

Pokud je jedna ze souřadnic R, G nebo B výstupních barev A_2, \dots, A_n vypočtena mimo interval $\langle 0; 255 \rangle$, výpočet je ukončen a uživatel informován, že v určeném směru $\overrightarrow{A_1 A_0}$ neexistují barevné odstíny o požadované barevné vzdálenosti, které by bylo možné zobrazit v rámci barevného prostoru sRGB.

2. Díky tomu, že barevný prostor sRGB nemá po převodu do CIELAB konvexní tvar (Burger a Burge, 2013), mohou tedy existovat vnitřní body úsečky $|A_1 A_0|$, které leží mimo prostor sRGB (obr. 69).

V tomto případě jsou souřadnice mimo prostor sRGB $R, G, B \notin \langle 0; 255 \rangle$ dodefinovány jako krajní hodnota intervalu $\langle 0; 255 \rangle$.

Uvedené problémy jsou ošetřeny následující podmínkou:

If $((R_i < 0 \text{ or } R_i > 255) \text{ or } (G_i < 0 \text{ or } G_i > 255) \text{ or } (B_i < 0 \text{ or } B_i > 255))$ then

If $(\Delta E_{00}(A_1, A_i) < \Delta E_{00}(A_1, A_0))$ then

If $(R_i < 0)$ then $R_i = 0$

If $(R_i > 255)$ then $R_i = 255$

If $(G_i < 0)$ then $G_i = 0$

If $(G_i > 255)$ then $G_i = 255$

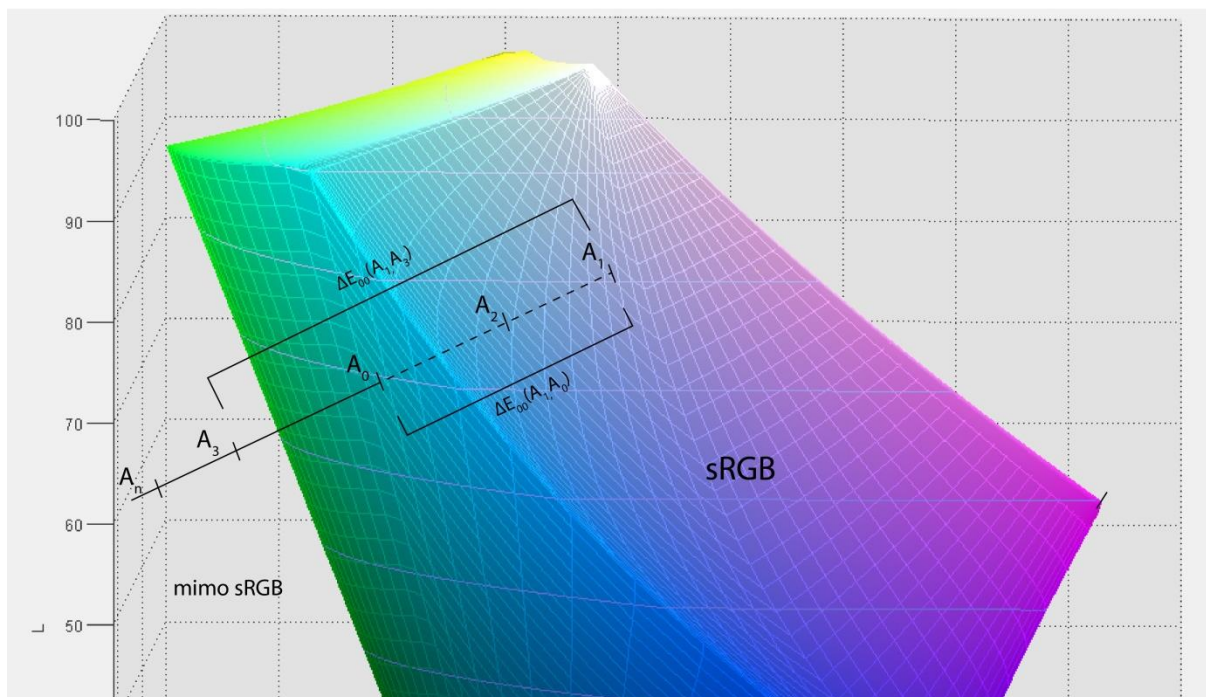
If $(B_i < 0)$ then $B_i = 0$

If $(B_i > 255)$ then $B_i = 255$

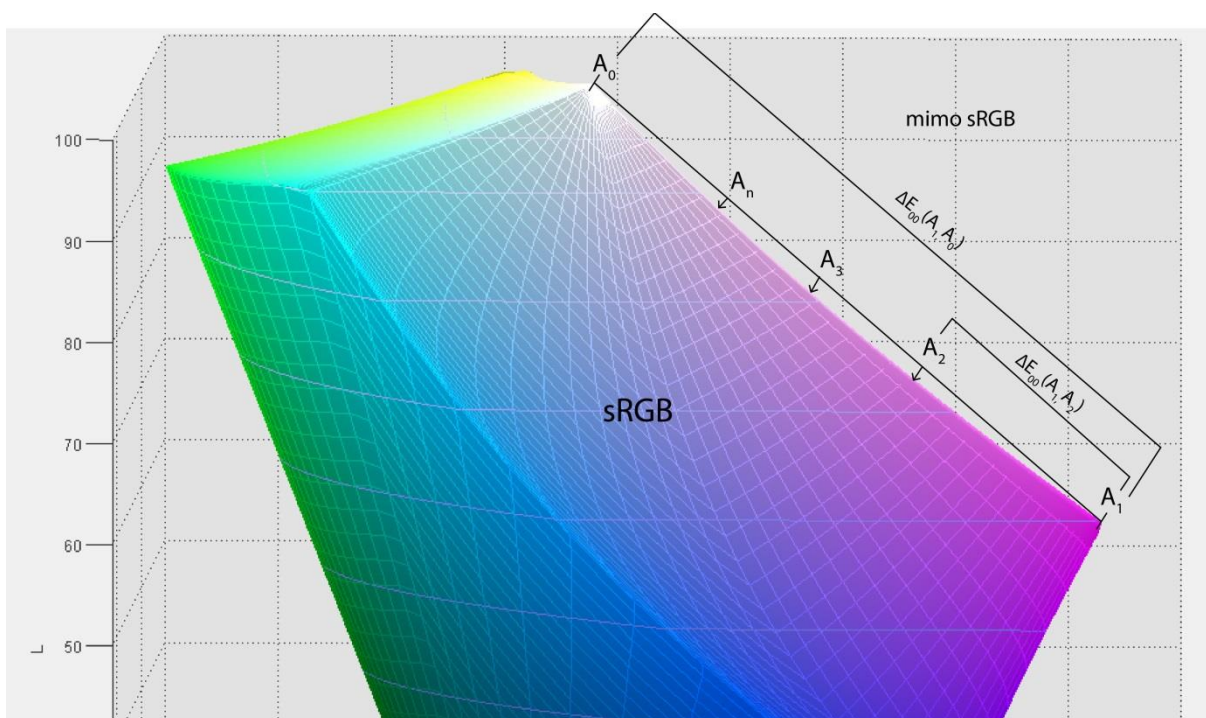
else

nepokračovat ve výpočtu barevné stupnice

kde $i \in \{2, \dots, n - 1\}$



Obrázek 68. Ukázka 1. problému na vizualizaci prostoru sRGB v CIELAB. Pro body A_3, \dots, n , které leží mimo prostor sRGB a tedy platí, že $\Delta E_{00}(A_1, A_3) \neq \Delta E_{00}(A_1, A_0)$ a proto je proces výpočtu barev stupnice ukončen.



Obrázek 69. Ukázka 2. problému na vizualizaci prostoru sRGB v CIELAB, kdy vnitřní body úsečky A_1A_0 , které odpovídají výsledným barvám A_i stupnice, leží mimo prostor sRGB. Zde platí, že $\Delta E_{00}(A_1, A_i) < \Delta E_{00}(A_1, A_0)$ a proto jsou hodnoty souřadnic sRGB $R, G, B \notin \langle 0; 255 \rangle$ zaokrouhleny k nejbližší možné hodnotě, tedy 255 nebo 0.

6.2 Doporučená manipulace s barvami na mapách

Autorka sestavila doporučený postup tvorby a reprodukce barevných digitálních a tištěných map s důrazem na využití systému správy barev pro možnost kontrolovatelné barevnosti výstupů.

Hodnocením systému správy barev v programech pro tvorbu map (studie *ColMan*, podkapitola 4.2) bylo zjištěno, že specializované GIS programy (např. ArcMap) systém správy barev nepodporují, a proto nejsou vhodné pro finální úpravy kartografických výstupů. Barevnost mapy zobrazené v takovém programu bude vždy záviset na konkrétním monitoru a nebude tak možné zajistit shodnost vizuálního vjemu u všech ostatních uživatelů mapy. Zároveň nebude možné simulovat barevnost mapy určené pro tisk. Proto autorka doporučuje finální úpravy map provádět v profesionálních grafických programech (např. produkty Adobe Creative Suite) a výsledným souborům připojovat vhodné ICC profily, které zaručí, že výsledná mapa (digitální, či tištěná) bude mít takovou barevnost, kterou autor mapy zamýšlel.

Na základě provedení šesti experimentálních studií (DC2, kapitola 5) bylo zjištěno, že barevná vzdálenost $\Delta E_{00}=2$ způsobuje výrazně horší výsledky při čtení map se sekvenčními a kvalitativními barevnými schémata než ostatní testované hodnoty barevné vzdálenosti ($\Delta E_{00}=4, 6, 8$ a 10). Dále bylo zjištěno, že pro sekvenční stupnice se šesti intervaly není vhodné používat uniformní rozložení hodnot barevných vzdáleností mezi jednotlivými odstíny. Nejlepší výsledky byly sledovány u stupnic s neuniformním rozložením hodnot barevné vzdálenosti (konkrétně ΔE_{00} 4-8-10-8-4).

Výzkum potvrdil barevnou vzdálenost jako významný činitel čitelnosti map. Proto autorka vytvořila nástroj *Sequential Color Scheme Generator 1.0*, který umožňuje tvorbu sekvenčních barevných stupnic s volitelnou barevnou vzdáleností mezi jednotlivými intervaly.

Na základě všech zkušeností získaných v průběhu disertačního výzkumu autorka navrhla postup pro tvorbu map pro prohlížení v internetovém prostředí i pro tisk s důrazem na zachování nastavených hodnot použitých barev.

6.2.1 Doporučený postup tvorby statických map pro prohlížení na internetu

Při přípravě map pro prohlížení na internetu je vhodné, aby kartograf pracoval na kalibrovaném monitoru, který umožňuje zobrazit celý barevný prostor sRGB. Jak bylo uvedeno v podkapitole 4.2, většina současných internetových prohlížečů podporuje správu ICC profilů a podle W3C by všechny obrázky a prvky webových stránek bez vloženého profilu by měly být prohlížečem zobrazovány tak, jako by měly přiřazený sRGB profil. Je tedy vhodné mapy pro internet vytvářet v pracovním prostředí simulujícím barevnost sRGB prostoru.

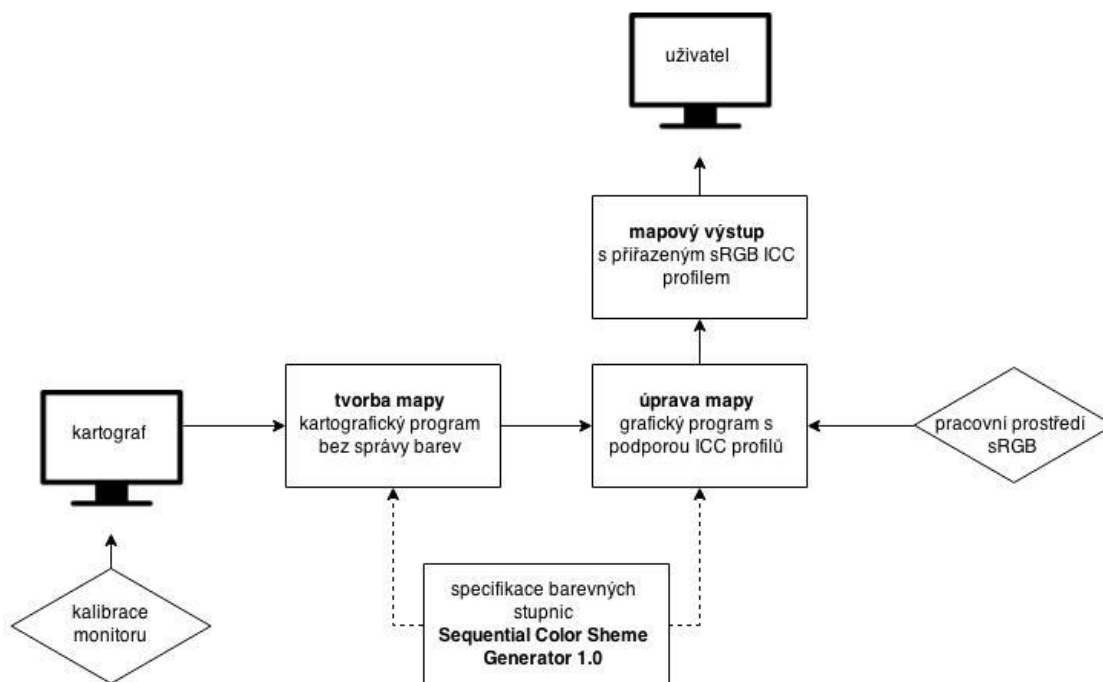
Pokud kartograf pracuje v prostoru sRGB a chce využít nástroj *Sequential Color Scheme Generator 1.0*, může RGB hodnoty intervalů barevných stupnic použít přímo, protože nástroj počítá barevnou vzdálenost právě v rámci sRGB prostoru. V jiném případě musí hodnoty RGB vztažené k sRGB prostoru nejprve převést do jiného prostoru. Pokud by hodnoty převzal bez konverze, pak by vypočtená barevná vzdálenost neodpovídala původně nastaveným hodnotám.

Je nutné zdůraznit, že barevnost digitálních map na internetu není možné zcela kontrolovat. Uživatelé map používají různé internetové prohlížeče, pracují na monitorech s různou technickou specifikací a odlišnými gamuty; řada z nich své monitory patrně nikdy nekalibrovala. Lze však předpokládat, že s použitím prostoru sRGB bude většina uživatelů schopna prohlížet mapy takovým způsobem, jaký byl kartografem zamýšlen.

Doporučený postup lze rozdělit do několika kroků:

1. Ve specializovaném GIS nebo kartografickém programu (např. ArcMap, OCAD) nachystat datový náhled, případně vytvořit kompozici mapy.
2. Vyexportovat mapu do souboru ve vektorovém formátu (například .pdf, .ai, .eps).
3. V grafickém programu (např. Adobe Illustrator) s nastaveným pracovním ICC profilem sRGB, otevřít vektorový soubor a převést ho do ICC profilu sRGB.
4. Upravit barevnost mapy do požadované podoby. Specifikace barevných stupnic z nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0* lze uplatnit v této fázi, ale i v kroku 1. (vzhled barev v GIS programu však nemusí odpovídat skutečnosti⁸)
5. Vyexportovat výslednou mapu s přiřazeným sRGB ICC profilem.

Schéma doporučeného postupu přípravy map pro prohlížení na internetu je na obrázku 70.



Obrázek 70. Doporučený postup přípravy mapy pro prohlížení na internetu. Použití nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0* je volitelné a lze jej aplikovat jak při přípravě map ve specializovaném programu pro tvorbu map, tak při finální úpravě v grafickém programu.

⁸ Pokud je gamut kartografova monitoru podobný sRGB, nebude vizuální rozdíl mezi výstupy v GIS programech bez správy barev a grafických programech se správou barev patrný. Problém by nastal při používání širokogamutového monitoru, na kterém se barvy v GIS programech budou jevit mnohem saturovanější, než ve skutečnosti jsou.

6.2.2 Doporučený postup tvorby map pro tisk

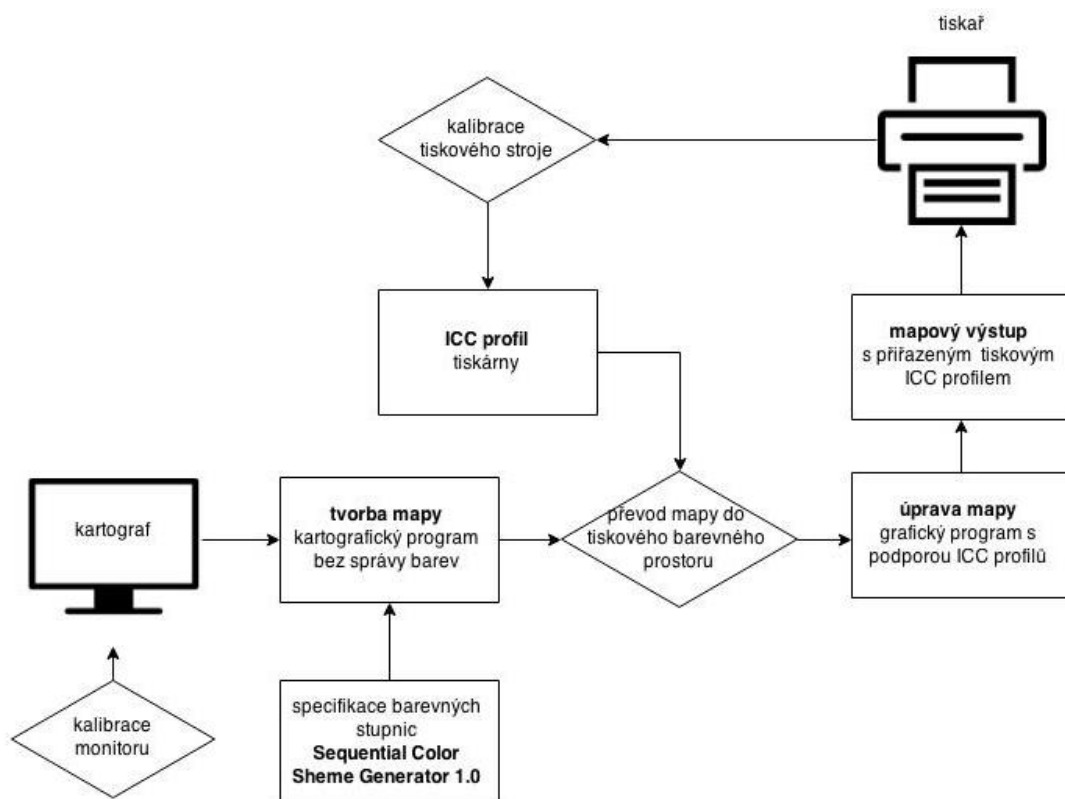
Při zachování správného postupu přípravy map pro tisk lze ušetřit spoustu času při komunikaci s tiskařem, ale i zklamání a peněz v případě, že výsledek neodpovídá požadovaným parametrům.

Při tisku map je nutné respektovat použitou technologii. Tato problematika je velice obsáhlá a není možné, ani není cílem ji v rámci disertační práce celou postihnout. Je však nejvýše nutné, aby byly dodržovány zejména základní principy a postupy tvorby tištěných map.

Přípravu map pro tisk lze rozdělit do následujících kroků:

1. Ve specializovaném GIS nebo kartografickém programu (např. ArcMap, OCAD) vytvořit datový náhled, případně vytvořit kompozici mapy, a výsledek vyexportovat do souboru vektorového formátu (například .pdf, .ai, .eps). V této fázi se doporučuje provést specifikaci barevných stupnic pomocí nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0*.
2. Zvolit technologii tisku a od tiskaře získat ICC profil tiskového stroje, který bude pro výrobu map použit.
3. V grafickém programu (např. Adobe Illustrator) otevřít vyexportovanou mapu z GIS programu (doposud bez správy barev) a převést ji do barevného prostoru, který je určen ICC profilem tiskového stroje. Tímto krokem se patrně velice výrazně změní barevnost celé mapy, protože barevné prostory monitorů a tiskáren se často významně liší. Pokud bylo pro mapy použito nastavení barevných stupnic z nástroje *Sequential Color Scheme Generator 1.0*, může se stát, že některé odstíny nebude možné z důvodu odlišnosti tiskového a sRGB profilu vytisknout. Při převodu do tiskového ICC profilu se tyto netisknutelné barvy převedou na nejbližší možné odstíny, proto barevná vzdálenost mezi změněnými odstíny nebude odpovídat nastaveným hodnotám (například se může stát, že vlivem převodu mezi ICC profily budou původně rozlišitelné barvy zcela nerozlišitelné).
4. Na základě vizuální kontroly v grafickém programu upravit barevnost mapy do požadované podoby.
5. Vyexportovat výslednou mapu z grafického programu do tiskového souboru s přiřazeným ICC profilem tiskárny.
6. Tisk mapy.

Schéma doporučeného postup přípravy map pro prohlížení na internetu je na obrázku 71.



Obrázek 71. Doporučený postup přípravy mapy pro tisk.

7 VÝSLEDKY

Disertační práce *Barevná vzdálenost v kartografii* byla zaměřena na zpřesnění a ucelení poznatků o procesu čtení mapy v souvislosti s vnímáním barevné vzdálenosti. V disertační práci byla barevná vzdálenost začleněna do konceptu vizuální vzdálenosti, byly stanoveny podmínky a metody měření barevné vzdálenosti a prostřednictvím výzkumných metod kognitivní kartografie provedeny experimentální studie vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost mapového obsahu.

Stanovené cíle disertační práce byly plněny ve třech navazujících částech, jejichž výsledky jsou uvedeny odděleně pro každý dílčí cíl.

7.1 DC1-Barevná vzdálenost v kartografické praxi

Z důvodu absence exaktních pravidel o uplatňování barevné vzdálenosti na mapách bylo hlavním východiskem prvního dílčího cíle poskytnout vlastnímu základnímu výzkumu teoreticko-praktický základ formou získání představy o současných aplikovaných postupech v moderním kartografickém designu a technologických možnostech zobrazování digitálních map s důrazem na jejich barevnost.

Celkem byly provedeny tři studie:

1. *Experiences*: Výzkum současných postupů při tvorbě map
2. *ColMan*: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map
3. *ColDist*: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

Studie Experiences

Studii byly zjišťovány názory a postupy zkušených kartografů při tvorbě map formou kvalitativního fenomenologického výzkumu prostřednictvím on-line dotazníku. Byly zkoumány tři zájmové okruhy: systém správy barev při tvorbě map, konstrukce barevných stupnic a využívání vědeckých poznatků v praxi.

Hlavními poznatky bylo, že jen malá část dotázaných kartografů má dostatečné znalosti o systému správy barev, který zabezpečuje jednotnou a kontrolovanou barevnost grafických výstupů na různých zařízeních (monitorech, tiskárnách). V praktické kartografii často není prostor dodržovat teoretická pravidla, například o optimálním počtu rozlišitelných intervalů sekvenčních stupnic. V praxi kartografové používají i více než 15 odstínů barvy, což je dvakrát více, než většina kartografických učebnic doporučuje.

Studie ColMan

V rámci studie byla testována podpora správy barev v programech pro tvorbu map, v internetových prohlížečích a v programech pro přípravu eye-tracking experimentů.

Bylo zjištěno, že testované profesionální GIS a kartografické programy (ArcMap, OCAD, QGIS, Saga GIS), ani programy pro přípravu eye-tracking experimentů (SMI Experiment Centre, Tobii Studio, Ogama) nepodporují správu barev. Všechny testované internetové prohlížeče (Internet Explorer, Google Chrome, Opera, Safari, Mozilla Firefox) podporují správu barev ICC profily ve verzi 2. Dva z nich ji podporují i ICC profily ve verzi 4.

Na základě testování byla učiněna následující doporučení pro přípravu map s ohledem na možnost kontroly výsledné barevnosti:

- nedoporučuje se provádět finální úpravy map v profesionálních GIS a kartografických programech; naopak je vhodné použít grafické programy umožňující správu barev (například Adobe Illustrator)
- mapy pro internet se doporučují vytvářet v rámci barevného prostoru sRGB a pokud je to možné, přiřazovat výsledným mapovým souborům ICC profil sRGB
- stimuly pro eye-tracking experimenty je vhodné vytvářet v prostředí umožňující simulovat barevnost laboratorního monitoru na základě kalibrací získaného ICC profilu tohoto monitoru

Studie ColDist

Protože kartografický výzkum nebyl doposud zaměřen na empirické stanovení minimální efektivní hodnoty barevné vzdálenosti pro odlišení kartografických znaků, v rámci studie *ColDist* byly zjišťovány hodnoty barevné vzdálenosti, které jsou v současné kartografii běžně používané, i když nezáměrně. Bylo provedeno hodnocení 18 barevných variant sekvenčních stupnic vzorníku ColorBrewer 2.0 o 9, 6 a 3 intervalech (obr. 18). Sousedícím intervalům jednotlivých stupnic byla vypočítána jejich barevná vzdálenost metodou CIEDE2000. Bylo zjištěno, že barevná vzdálenost mezi intervaly není v rámci jednotlivých stupnic konstantní. Mediánová barevná vzdálenost ΔE_{00} stupnic s 9 intervaly je $Mdn=10,28$ ($min=3,04$; $max=20,46$; obr. 22), se 6 intervaly je $Mdn=12,41$ ($min=6,24$; $max=26,44$; obr. 23), zatímco se 3 intervaly je téměř dvojnásobná $Mdn=20,61$ ($min=11,26$; $max=33,92$; obr. 24). Tato měření se stala základem pro stanovení testovaných hodnot pro vlastní experimenty.

7.2 DC2-Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti

Druhý dílčí cíl disertační práce byl zaměřen na empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo kvantita je reprezentovaná barvou.

Výzkum byl proveden formou eye-tracking testování a dotazníkového šetření. Bylo provedeno celkem 6 experimentů, které byly zaměřeny na hodnocení barevnosti popisu, sekvenčních a kvalitativních barevných schémat s uniformním a neuniformním (konkávním) rozložením hodnot barevné vzdálenosti mezi jejich intervaly, resp. kategoriemi:

1. *Labels*: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na čitelnost popisu v mapách
2. *Schemes*: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost
3. *Euclid*: Vliv vzdálenost znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení
4. *Order*: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy
5. *Optimization*: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic
6. *Hue*: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

V průběhu testování byla zjišťována správnost odpovědí, čas do odpovědi a vybrané eye-tracking metriky (průměrná délka fixací, frekvence fixací, rychlost scanpath a přesuny mezi AOI). Nejdůležitější závěry vyplynuly z analýzy výkonnostních metrik (tedy správnosti a času do odpovědi); eye-tracking metriky většinou tyto závěry potvrdily, ale nepřinesly více vysvětlení o studované problematice. Bylo učiněno několik důležitých poznatků o vnímání barevné vzdálenosti na mapách, které jsou shrnuty pro každý z provedených experimentů.

Labels

Cílem experimentu bylo zjistit vliv barevné vzdálenosti mezi popisem na mapě a podkladem, velikosti písma a kombinace obou proměnných na schopnost uživatelů vyhledat na mapě administrativních jednotek vybraných států USA určený popis. Bylo testováno 5 úrovní barevné vzdálenosti mezi popisem a podkladem $\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100 a 3 úrovně velikosti písma $8, 11$ a 14 pt.

Všechny testované hodnoty barevné vzdálenosti mezi písmem a popisem byly pro vyhledání názvu administrativní jednotky na mapě vyhovující. Správnost odpovědí, která patří mezi klíčové ukazatele použitelnosti, byla 100% . Čas strávený řešením úlohy však ukázal, že čím je barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem nižší, tím déle trvá jeho identifikace.

Výsledky experimentu byly publikovány v článcích Brychtová a Çöltekin (2014) a Brychtová (2012).

Schemes

V experimentu *Schemes* byl systematicky analyzován vliv barevné vzdálenosti na použitelnost sekvenčních a kvalitativních barevných schémat. Bylo hodnoceno 5 sekvenčních a 5 kvalitativních barevných schémat o šesti intervalech resp. kategoriích odlišených jednotnou barevnou vzdáleností $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ a 10 . Účastníci měli za úkol porovnat barevnost dvou nebo tří areálů označené tečkou a posoudit barevnost jejich výplně.

Analýza dat jasně ukázala, že nejnižší testovaná hodnota barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 2$ mezi dvěma intervaly/kategoriemi sekvenčních/kvalitativních barevných schémat vedla k největšímu počtu chyb a výraznému zpomalení odpovědí při odlišování kvality/kvantity areálů na mapě. s rostoucí barevnou vzdáleností konstantně rostla správnost i rychlost odpovědí. Stanovení optimální hodnoty barevné vzdálenosti vyžaduje určení prahové hodnoty, která nesmí být danou překročena. Tu však nelze určit zcela objektivně. Zadaný úkol, který respondenti řešili, byl extrémně jednoduchý a nevyžadoval žádné speciální znalosti, proto by správnost měla být téměř stoprocentní. Tak vysoká správnost nebyla zaznamenána u žádné ze sledovaných hodnot ΔE_{00} . Při stanovení akceptovatelné míry správnosti 95% by na základě měření z webového průzkumu i eye-tracking testování podmínky bezpečně splnila pouze $\Delta E_{00} = 10$.

Výsledky experimentu byly publikovány v článku (Brychtová, 2013) a byly přijaty pro publikaci v 1. vydání časopisu *International Journal of Cartography*.

Euclid

Experiment byl zaměřen na hodnocení vlivu barevné vzdálenosti v souvislosti s prostorovou vzdáleností areálových znaků na mapě a zjistit, jaký je vliv prostorové vzdálenosti na rozlišitelnost kategorií sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

Experimentem bylo zjištěno, že schopnost respondentů správně porovnat kvalitu i kvantitu dvou areálů konzistentně klesá s jejich vzájemnou (prostorovou) vzdáleností na mapovém listu.

Zkoumáním vzájemného působení barevné i prostorové vzdálenosti bylo zjištěno, že pro sekvenční stupnice je vhodné používat pouze nejvyšší testovanou hodnotu barevné vzdálenosti $\Delta E_{00}=10$, při které správnost odpovědí není ovlivněna vzájemnou prostorovou vzdáleností dvou areálů. Ze stejných důvodů je pro odlišení kategorií kvalitativních stupnic doporučeno používat barevnou vzdálenost $\Delta E_{00}=8$ a $\Delta E_{00}=10$.

Studie *Schemes* a *Euclid* ukázaly, že rozlišení dvou areálů sekvenčních stupnic je obtížnější než areálů kvalitativních stupnic, i když je barevná vzdálenost stejná.

Order

Experiment byl zaměřen na výzkum vlivu *barevné vzdálenosti* mezi intervaly sekvenčních barevných stupnic na schopnost uživatelů přiřadit vybranému areálu na mapě správný interval legendy. Oproti předchozím studiím *Schemes* a *Euclid*, v nichž byla porovnávána barevnost dvou nebo tří areálů v mapě, bylo v této studii úkolem přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě.

Bylo zjištěno, že schopnost uživatelů zjistit správnou odpověď na téže mapě je značně ovlivněno typem úlohy: srovnání barevnosti dvou areálů (v experimentech *Schemes* a *Euclid*) je mnohem jednodušší než určenému areálu najít odpovídající interval v legendě (v experimentu *Order*).

Dalším významným zjištěním bylo, že na správnost odpovědí mělo významný vliv pořadí intervalů v barevné stupnici. Nejsvětější (A) a nejtmaší (F) intervaly bylo snazší spojit s odpovídající položkou v legendě, zatímco prostřední intervaly činily více obtíží. Na základě tohoto výsledku bylo zjištěno, že uniformní rozložení barevné vzdálenosti mezi intervaly nebylo optimální.

Výsledky experimentu byly publikovány v článku Brychtová (2014).

Optimization

Na základě předchozích výsledků byly v experimentu *Optimization* hodnoceny optimalizované sekvenční stupnice, pro jejichž intervaly bylo oproti předchozím experimentům využito konkávní rozložení barevných vzdáleností. Prostřední intervaly stupnic byly více vizuálně odlišeny, než krajní intervaly. Byly testovány tři stupnice s rozložením ΔE_{00} 4-8-10-8-4, 6-8-10-8-6 a 4-6-8-10-12. Úkolem pro respondenty bylo přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě.

V porovnání se stupnicemi s uniformním rozložením barevné vzdálenosti mezi intervaly všechny optimalizované stupnice způsobily značné zvýšení správnosti odpovědí i času do jejich nalezení (tab. 17). Nejlepším řešením se ukázala stupnice ΔE_{00} 4-8-10-8-4.

Výsledky experimentu byly publikovány v článku Brychtová (2014).

Hue

V posledním experimentu bylo hodnocen vliv tónu sekvenčních stupnic se shodným nastavením barevné vzdálenosti mezi jejich intervaly ověřit, na schopnost respondentů přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě. Byly testovány dvě sekvenční stupnice (zelená a červená) s konkávním rozložením barevných vzdáleností mezi intervaly ΔE_{00} 6-8-10-8-6.

Experiment potvrdil, že i přes proměnlivou citlivost lidského oka na různé části viditelného spektra, tón sekvenčních stupnic neovlivní schopnost uživatelů mapy nalézt správnou odpověď, pokud jsou ve stupnicích zachovány stejné hodnoty barevné vzdálenosti.

Výsledky experimentu byly publikovány v článku Brychtová a Vondráková (2014).

7.3 DC3-Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic

Poslední dílčí cíl představuje praktické vyvrcholení celého disertačního výzkumu. Na základě poznatků o vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost map byl navrhnut a vytvořen nástroj pro konstrukci sekvenčních barevných schémat *Sequential Color Scheme Generator 1.0*, který umožňuje uživatelské nastavení barevnosti schématu, počet odstínů (intervalů) stupnice a barevné vzdálenosti ΔE_{00} mezi nimi. Ve výchozím nastavení nástroje jsou přednastaveny parametry sekvenční stupnice, které byly v rámci disertační práce vyhodnoceny jako nejlepší (6 intervalů stupnice s barevnými vzdálenostmi ΔE_{00} 4-8-10-8-4). Nástroj je volně dostupný na webových stránkách <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

Základní koncepce vytvořeného nástroje byla publikována konferenčním příspěvkem Brychtová a Doležalová (2014).

V poslední části bylo uvedeno doporučení pro přípravu map pro internet a tisk s ohledem na správnou manipulaci s barvami.

8 DISKUZE

V průběhu řešení disertační práce se vyskytly problémy, které mohly být řešeny různými metodami a postupy. Rozhodnutí pro použití konkrétního řešení, které autorka považuje za kontextu řešené problematiky za nejvíce zásadní, jsou uvedena v této kapitole včetně jejich zdůvodnění.

Počet respondentů studií a experimentů

Čím více respondentů se účastní experimentu, tím jsou jeho výsledky statisticky silnější. Holmqvist a kol. (2011) uvádějí, že pro každou testovanou podmínku by mělo být monitorováno alespoň 10 respondentů. To by například u experimentu *Labels* (podkapitola 5.1) znamenalo oslovit 150 respondentů (5 hodnot barevné vzdálenosti \times 3 velikosti písma = 15 testovaných podmínek). Vzhledem k organizační náročnosti eye-tracking experimentů je nemožné otestovat tak velkou populaci a na základě existujících studií je patrné, že to není zcela nezbytné. Podle eye-tracking metodologie, kterou vypracovali Pernice a Nielsen (2009) je pro kvantitativní testování dostačující získat data od 20 respondentů. Ve vybraných publikovaných kartografických eye-tracking experimentech Russo et al. (2014) otestovali 50 respondentů, Deeb et al. (2014) otestovali 31 respondentů, Garlandini a Fabrikant (2009) 20 respondentů. Autorka se tedy domnívá, že množství otestovaných respondentů v experimentech disertačního výzkumu, které neklesá pod počet 35, je dostačující.

Struktura respondentů

V případě eye-tracking experimentů, včetně těch, které byly provedeny v rámci disertačního výzkumu, je častým problémem oslovení dostatečně různorodé populace. Velice často na experimentech participují studenti a zaměstnanci univerzit, kteří jsou akademickým výzkumníkům pohodlně k dispozici. Výběr takovéto populace může být kritizován kvůli její velice úzké profilaci, která je dána věkem, jejich podobným vzděláním, zkušenostmi a životním stylem. Autorka se ale domnívá, že v případě experimentů zaměřených čistě na výzkum percepce určitého jevu (v případě disertačního výzkumu barevné vzdálenosti), nezáleží na vzdělání, ani životních zkušenostech, ale spíše na fyziologických odlišnostech respondentů. Proto lze výběr respondentů eye-tracking experimentů považovat za dostačující.

Ve všech experimentech disertačního výzkumu bylo balancováno zastoupení respondentů podle jejich pohlaví a odbornosti v oblasti kartografie. To bylo učiněno jednak kvůli kontrole případných rozdílností řešení úkolů mezi muži, ženami a experty a laiky, ale také z důvodů jejich důkladného studia, které bylo motivováno zájmem diskutovat možnosti vzdělávacích strategií (Měli bychom různé skupiny lidí vzdělávat odlišnými způsoby?) a přizpůsobování vzhledu map (Měli bychom vzhled map přizpůsobovat podle charakteristik jejich uživatelů?).

Z časových důvodů nebylo srovnání uvedených skupin respondentů v disertační práci uvedeno. Přesto se o něj autorka v rámci experiment *Labels* pokusila a zjistila, že odpovědi zkoumaných skupin respondentů se nelišily v čase do zjištění odpovědi, zatímco rozdíly ve všech eye-tracking metrikách byly signifikantní. To naznačuje, že ačkoli byl celkový výkon respondentů stejný, jejich strategie čtení mapy se odlišovala. Tato problematika bude hlouběji studována v samostatných pracích autorky.

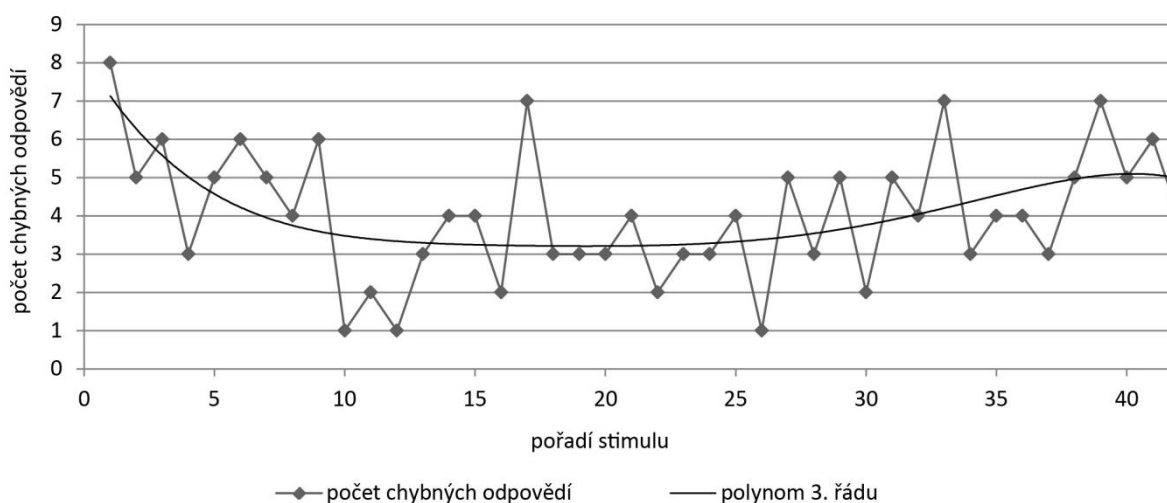
Struktura dotazníkového šetření

Zvolený způsob dotazníkového šetření, které bylo provedeno v rámci experimentů *Schemes* (podkapitola 5.2) a *Euclid* (podkapitola 5.3) nebyl pravděpodobně zcela vhodný. Dotazníku se zúčastnilo celkem 608 dobrovolníků, z nichž pouze 211 odpovědělo na všechny otázky. Velký počet nedokončených odpovědí (celkem 353) je indikátorem ne zcela vhodně navrženého experimentu. Jeho časové nároky evidentně přesáhly únosnou míru většiny dotázaných osob. Dotazník obsahoval celkem 106 stimulů s velice monotónním zadáním (porovnat barevnost dvou areálů a rozhodnout, zda se liší či ne). Pravděpodobně by bylo vhodnější z celé sady experimentálních stimulů náhodně vybrat omezený počet stimulů pro jednoho přihlášeného respondenta a zajistit tak příjemnější průběh testování a zároveň dostatečný počet odpovědí na testované podmínky.

Efekt učení

Z důvodu zamezení (nebo rozptýlení) tzv. efektu učení bylo pořadí stimulů v experimentech pro každého účastníka jedinečné. Efekt učení je považován za běžný, avšak nežádoucí zdroj zkreslení experimentálních výsledků, při kterém dochází k naučení se reagovat na experimentální otázky a potenciálně odpovídat správněji ke konci experimentu.

Snahou autorky bylo ověřit, zda náhodné pořadí stimulů opravdu efekt učení rozptýlí. Bylo předpokládáno, že by se efekt učení mohl projevit především při dotazníkovém šetření v experimentech *Schemes* a *Euclid*, při kterém byla zapojena velká populace na velké množství stimulů. Bohužel nástroj Lime Survey 1.9, který byl použitý pro sběr dat, neumožnil rekonstrukci jedinečného pořadí stimulů pro respondenty, a proto byl efekt učení zkoumán pouze při eye-tracking testování uvedených experimentů. Graf na obr. 72 ukazuje vývoj celkového počtu chybných odpovědí podle pořadí stimulu v rámci experimentu bez ohledu na zkoumanou hodnotu barevné nebo prostorové vzdálenosti. Proložení dat polynomem 3. řádu naznačuje, obtíže respondentů v průběhu experimentu klesaly a ke konci mírně vzrostly. Vzhledem k počtu zapojených stimulů a respondentů by však těmto výsledkům neměla být přikládána velká váha.



Obrázek 72. Vývoj počtu chybných odpovědí v průběhu experimentů *Schemes* a *Euclid*.

Kontrola vlivu nežádoucích nezávislých proměnných

Patrně největším problémem všech experimentálních studií je zamezit vlivu nežádoucích nezávislých proměnných, ale zároveň zachovat ekologickou validitu experimentu, která vyjadřuje možnost přenesení závěrů z experimentu i na jevy v reálných podmínkách (Sternberg, 2002).

Za nežádoucí nezávislé proměnné lze považovat všechny parametry stimulu, které ovlivní vnímání studované problematiky způsobem, který nelze popsat a tím pádem ani vyloučit. V případě studia barevné vzdálenosti na mapách může mezi nežádoucí proměnné patřit například proměnlivá velikost a tvar areálů na mapě, prostorové uspořádání barevných areálů, parametry hranic areálů, parametry popisu na mapě (včetně jeho uspořádání a délky slov popisu) a další prvky, které jsou na mapách běžně používány.

Stimuly použité v experimentech *Schemes*, *Euclid*, *Order*, *Optimization* a *Hue* byly statické mapy fiktivního území bez popisu, zjednodušené ve smyslu tematického obsahu a grafického provedení. Velikost a tvar zobrazených areálů byly přibližně stejné. Parametry hranic areálů byly na všech stimulech stejné.

Klíčovým problémem bylo vyřešit prostorové uspořádání barevnosti, tak aby areály určené k porovnání nebyly ovlivněny efektem simultánního kontrastu. V úvahu přišly tři varianty rozmístění barev:

1. porovnávané areály obklopit všemi barvami používanými v testované barevné stupnici,
2. porovnávané areály obklopit jednotnou barvou, která se v testovaných stupnicích nevyskytuje (např. šedou),
3. areály stimulu náhodně obarvovat odstíny testované stupnice bez žádné kontroly.

Na základě důkladné rozvahy bylo rozhodnuto, že uspořádání barev na stimulu, včetně umístění areálů určených k porovnání, bude zcela náhodné (varianta 3), aby byla ekologická validita experimentu maximálně zachována. Bylo předpokládáno, že případný vliv simultánního kontrastu bude díky velkému množství testovaných stimulů rozptýlen.

V případě experimentu *Labels* nebyla kontrola vlivu nežádoucích nezávislých proměnných zcela důsledná. V tomto experimentu byly za stimuly zvoleny mapy konkrétních států s jejich administrativními jednotkami, jejichž počet, tvar, velikost i prostorové rozmístění nebylo v průběhu experimentu jednotné, a mohlo tedy negativně ovlivnit výsledky.

V tezí disertační práce, které byly obhájeny 30. září 2013, bylo naplánováno provést testování vlivu barevné vzdálenosti na reálných mapách. Pro tento účel byla použita data z eye-tracking experimentu na testování percepce fenologických map, který provedl Aleš Vávra ve své práci (Vávra, 2015). V průběhu hodnocení naměřených dat v souvislosti s barevnou vzdáleností na mapách bylo ale zjištěno, že výsledky jsou silně ovlivněny rozložením mapovaného jevu na stimulech a proto nebylo možné vliv barevné vzdálenosti hodnotit. Autorka (Brychtová, 2014b) provedla popis barevných stupnic použitých v Atlase fenologických poměrů Česka z hlediska použité barevné vzdálenosti. Testování uživatelské percepce těchto stupnic bude provedeno v budoucnosti.

Poruchy barvocitu

V průběhu experimentu byli respondenti dotázáni, zda jim byla lékařsky potvrzena porucha barvocitu. Toto postižení bylo testováno i prostřednictvím pseudoizochromatických tabulek. Pokud respondent uvedl, že má diagnostikovanou některou poruchu barvocitu, nebo neuspěl v testu barvocitu, jeho výsledky nebyly do vyhodnocení experimentu zahrnuty.

Není jasné, zda pro osoby trpící poruchou barvocitu platí stejné výpočetní rovnice barevné vzdálenosti, jako pro zdravé jedince. Na základě výzkumu poruch barvocitu je zřejmé, že větší obtíže s rozlišováním barev se projeví u kvalitativních a divergentních barevných schémat, než u monochromatických sekvenčních, pokud jejich barvy leží na tzv. *confusion lines* (Brewer, 1996a)(confusion lines jsou linie spojující nerozlišitelné barevné odstíny v prostoru CIE 1931 XYZ pro osoby postižené určitými poruchami barevného vidění).

Problematika vnímání barevné vzdálenosti osobami s poruchou barvocitu nebyla v této práci z časových důvodů zkoumána, ale protože se jedná o důležité téma, bylo by vhodné ho podrobit dalšímu uživatelskému testování.

Nedostupnost spektrofotometru

Vzhledem k nedostupnosti kvalitního spektrofotometru (zařízení umožňující přesné měření barev emitovaných monitorem) byla barevná vzdálenost počítána pouze teoreticky vůči předpokládaným vlastnostem zobrazovacích zařízení. V případě, že barevné výstupy mají přiřazený ICC profil sRGB IEC61966-2.1 a jsou zobrazeny na kalibrovaném monitoru v programu, který podporuje správu barev, lze předpokládat, že uvedené výpočty korespondují s realitou.

9 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo vyzkoumat vliv barevné vzdálenosti na čitelnost vizualizované prostorové informace v mapě. Pro dosažení cíle bylo nejprve nutné nastudovat problematiku vnímání barev člověkem, zjistit postupy a prostředky pro popis barev a vybrat nejvhodnější metodu výpočtu barevné vzdálenosti.

V disertační práci byla barevná vzdálenost začleněna do konceptu vizuální vzdálenosti, byly stanoveny podmínky a metody měření barevné vzdálenosti a prostřednictvím výzkumných metod kognitivní kartografie provedeny experimentální studie vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost mapového obsahu.

V první části práce proběhl výzkum přístupu zkušených kartografů k tvorbě map z hlediska výběru a reprodukce barev. Byly hodnoceny nástroje pro správu barev vybraných kartografických programů a zjišťovány hodnoty barevné vzdálenosti, které jsou na mapách běžně používány, i když nezáměrně.

Hlavním východiskem prvního dílčího cíle bylo poskytnout vlastnímu základnímu výzkumu teoreticko-praktický základ formou získání představy o současných aplikovaných postupech v moderním kartografickém designu a technologických možnostech zobrazování digitálních map s důrazem na jejich barevnost.

Stěžejní částí disertačního výzkumu bylo empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo kvantita je reprezentovaná barvou. Bylo provedeno šest experimentů s cílem najít optimální hodnoty barevné vzdálenosti mezi popisem a mapovým podkladem a mezi intervaly a kategoriemi sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

Disertační práce vyústila ve vytvoření nástroje pro tvorbu sekvenčních barevných stupnic, který umožňuje nastavení počtu odstínů (intervalů) a jejich vzájemné vizuální vzdálenosti určené prostřednictvím metody výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000. Používání nástroje v souladu se závěry disertačního výzkumu umožní všem tvůrcům map tvořit efektivní mapové výstupy.

Problematika barevné vzdálenosti a jejího vlivu na proces čtení map nebyla v domácí, ani světové literatuře doposud popsána. Z tohoto důvodu je teoretická i praktická část disertační práce ojedinělá. Výsledky provedeného experimentálního výzkumu i vytvořený nástroj pro konstrukci sekvenčních stupnic rozšířily oblast kartografického výzkumu se zaměřením na hodnocení použitelnosti map, pomohou objasnit způsob vnímání barev na mapách a zároveň je lze přímo aplikovat v praktickém procesu tvorby map.

Výsledky disertační práce byly a budou zveřejněny ve vědeckých publikacích, časopisech pro odbornou veřejnost i prostřednictvím sociálních sítí.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- Adobe Systems Inc. (2000a), "CIELAB", Technical Guides, available at:
http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/cielab.html (accessed 18 June 2014).
- Adobe Systems Inc. (2000b), "Color Management Systems", Technical Guides, available at:
http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/manage/cmsdef.html (accessed 3 November 2013).
- Albers, J. (2013), *Interaction of Color*, Yale University Press, p. 208.
- Al-Ghamdi, A.M. (2014), "Optimising the Selection of a Number of Choropleth Map Classes", in Bandrova, T., Konecny, M. a Zlatanova, S. (Eds.), *Thematic Cartography for the Society*, Springer International Publishing, Lecture No., pp. 61–77.
- Apple Inc. (2015), "Mac OS X 10.6: About ColorSync", Support, available at:
https://support.apple.com/kb/ph6826?locale=en_US (accessed 5 March 2015).
- Bartz, B. (1970), "Experimental Use of the Search Task in an Analysis of Type Legibility in Cartography", *The Cartographic Journal*, Maney Publishing, Vol. 7 No. 2, pp. 103–112.
- Battersby, S.E. a Clarke, K.C. (2003), "Information Content in Map Generalization", *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, pp. 10 – 16.
- Bělka, L. a Voženílek, V. (2013), "Prototypes of Orthoimage Maps as Tools for Geophysical Application", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 171 No. 6, pp. 1047–1059.
- Belongie, S., Malik, J. a Puzicha, J. (2002), "Shape matching and object recognition using shape contexts", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24 No. 4, pp. 509–522.
- Berlin, B. (1999), *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*, Center for the Study of Language and Inf, Center for., p. 201.
- Bertin, J. (1983), *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*, p. 456.
- Bjorke, J.T. (1996), "Framework for Entropy-based Map Evaluation", *Cartography and Geographic Information Systems*, Vol. 23 No. 2, pp. 78–95.
- Bjorke, J.T. a Saeheim, K. (2007), "Investigation of the channel capacity of seafloor maps.pdf", *ScanGIS'2007*, pp. 61 – 73.
- Bláha, J.D. a Štěrba, Z. (2014), "Colour Contrast in Cartographic Works Using the Principles of Johannes Itten", *The Cartographic Journal*, Vol. 51 No. 3, pp. 203–213.
- Borg, L. (2003), "Is your system ICC Version 4 ready?", *International Color Consortium*, available at:
<http://www.color.org/version4html.xalter> (accessed 6 August 2014).
- Brainard, D.H. (2003), "Color Appearance and Color Difference Specification", in Shevell, S.K. (Ed.), *The Science of Color: Second Edition*, Elsevier B.V., 2nded., pp. 191–216.
- Brewer, C.A. (1989), "The development of process-printed Munsell charts for selecting map colors", *The American Cartographer*, Vol. 16 No. 4, pp. 269–278.
- Brewer, C.A. (1992), "Review of colours terms and simultaneous contrast research for cartography", *Cartographica*, Vol. 29 No. 3 and 4, pp. 20–31.
- Brewer, C.A. (1994), "Color Use Guidelines for Mapping and Visualization", in MacEachren, A.M. (Ed.), *Visualization in Modern Cartography*, Taylor, Elsevier Science, Tarrytown, NY, pp. 123–147.
- Brewer, C.A. (1996a), "Guidelines for Selecting Colors for Diverging Schemes on Maps", *The Cartographic Journal*, Vol. 33 No. 2, pp. 79–86.
- Brewer, C.A. (1996b), "Prediction of Simultaneous Contrast between Map Colors with Hunt's Model of Color Appearance", *Color Research and Application*, Vol. 21 No. 3, pp. 221–235.
- Brewer, C.A. (1997), "Spectral Schemes: Controversial Color Use on Maps", *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 24 No. 4, pp. 203–220.
- Brewer, C.A. (1999), "Brewer - Color Use Guidelines for Data Representation", *Annual Meeting of the American Statistical Association, Proceedings of the Section on Statistical Graphic*, Maryland, Baltimore, pp. 55–60.

- Brewer, C.A., Hatchard, G.W. a Harrower, M.A. (2003), "ColorBrewer in Print: A Catalog of Color Schemes for Maps", *Cartography and Geographic Information Society*, Vol. 30 No. 1, pp. 5–32.
- Brodersen, L., Andersen, H.H.K. a Weber, S. (2001), Applying eye-movement tracking for the study of map perception and map design, *National Survey and Cadastre - Denmark*, p. 98.
- Brown, A.M., Lindsey, D.T. a Guckes, K.M. (2011), "Color names , color categories , and color-cued visual search : Sometimes , color perception is not categorical", *Journal of Vision*, Vol. 11/12 No. 2, pp. 1–21.
- Brychtová, A. (2012), "Visual distance of map symbols: evaluation of map readability with eye-tracking", *First InDOG doctoral conference, Univerzita Palackého v Olomouci*, p. 4.
- Brychtová, A. (2013), "Color Distance on Maps", *Second InDOG doctoral conference, Univerzita Palackého v Olomouci*, pp. 16–19.
- Brychtová, A. (2014a), "Exploring the influence of colour distance and legend position on choropleth maps readability", in Brus, J., Vondráková, A. and Voženílek, V. (Eds.), *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014, Lecture No.*, pp. 315–326.
- Brychtová, A. (2014b), "Evaluation of Colour Schemes Usability in Atlas of the Phenological Conditions in Czechia", *Third InDOG doctoral conference*, pp. 24–27.
- Brychtová, A. a Çöltekin, 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*, Vol. 51 No. 4, p. 1743277414Y.000.
- Brychtová, A. a Doležalová, J. (2014), "Optimalizace barev pro efektivní vizualizaci geografických dat", *Sborník abstraktů - Geografie v srdci Evropy 2014, Praha*, p. 231.
- Brychtová, A. a Popelka, S. (2012), "Eye-tracking v kartografii", *Aktivity v kartografii, Kartografická spoločnosť Slovenskej republiky*, pp. 20–28.
- Brychtová, A., Popelka, S. a Dobešová, Z. (2012), "Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles", *SGEM 2012 Conference Proceedings Volume II, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria*, pp. 1041–1048.
- Brychtová, A. a Vondráková, A. (2014), "Green versus Red: Eye-tracking evaluation of sequential colour schemes", *SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings Volume III, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria*, p. 8.
- Buard, E. a Ruas, A. (2009), "Processes for Improving the Colours of Topographic Maps in the Context of Map-on-demand", *Proceedings of the 24th International Cartographic Conference, Santiago, Chile*, p. 11.
- Burger, W. a Burge, M.J. (2013), *Principles of Digital Image Processing: Advanced Methods, Springer, Undergradu.*, p. 369.
- Carter, R. a Huertas, R. (2009), "Ultra-large color difference and small subtense", *Color Research & Application*, Vol. 35 No. 1, pp. 4–17.
- CIE. (2012a), "Colour (perceived)", *Termlist of International Commission on Illumination*, available at: <http://eilv.cie.co.at/term/198> (accessed 12 February 2012).
- CIE. (2012b), "Termlist of International Commission on Illumination", available at: <http://eilv.cie.co.at/>.
- CIE. (2012c), "CIE 1976 L*a*b* colour difference", *Termlist of International Commission on Illumination*, available at: <http://eilv.cie.co.at/term/156> (accessed 15 October 2012).
- CIE. (2014a), "Color", *Termlist of International Commission on Illumination*, available at: <http://eilv.cie.co.at/term/190> (accessed 15 September 2013).
- CIE. (2014b), "CIEDE2000 Colour-Difference Formula", *Colorimetry - Part 6*, available at: http://www.cie.co.at/index.php?i_ca_id=886 (accessed 9 May 2014).
- Çöltekin, A., Demšar, U., Brychtová, A. a Vandrol, J. (2014), "Eye-Hand Coordination During Visual Search on Geographic Displays", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research*, pp. 12–16.
- Çöltekin, A., Fabrikant, S.I. a 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*, Vol. 24 No. 10, pp. 1559–1575.

- Çöltekin, A., Heil, B., Garlandini, S. a Fabrikant, S.I. (2009), "Evaluating the Effectiveness of Interactive Map Interface Designs: A Case Study Integrating Usability Metrics with Eye-movement Analysis", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 36 No. 1, pp. 5–17.
- Creswell, J.W. (1997), *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches*, Sage Publications, London, p. 424.
- Cybulski, P. (2014), "Rotating Point Symbols on Animated Maps for the Presentation of Quantitative Data", *Kartographische Nachrichten*, No. 08, pp. 198–203.
- Deeb, R., De Maeyer, P. a Ooms, K. (2011), "The influence of Jaques Bertin", *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference*, Paris, France, p. 8.
- Deeb, R., Ooms, K., Brychtová, A., Van Eetvelde, V. a De Maeyer, P. (2014), "Background and foreground interaction: Influence of complementary colors on the search task", *Color Research & Application*, p. n/a–n/a.
- Deeb, R., Ooms, K. a Maeyer, P. De. (2012), "Typography in the Eyes of Bertin, Gender and Expertise Variation", *The Cartographic Journal*, Vol. 49 No. 2, pp. 176–185.
- Dent, B.D., Torguson, J.S. a Hodler, T.W. (2009), *Cartography: Thematic Map Design*, Thomas Timp, 6th ed., p. 336.
- Van Dijk, S.F. (2001), *Genetic algorithms for map labeling*, Utrecht University.
- Doddi, S., Marathe, M. V., Mirzaian, A., Moret, B.M. a Zhu, B. (1997), "Map Labeling and Its Generalizations", *Proceedings of the eighth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, pp. 148–157.
- Dyer, J. (2007), "PhotoShop-like JavaScript Color Picker", John Dyer's Code, available at: <http://johndyer.name/photoshop-like-javascript-color-picker/> (accessed 10 November 2014).
- Eastman, J.R. a Bertin, J. (1986), "Semiotics in Cartography", *Economic Geography*, Vol. 62 No. 1, p. 104.
- Fabrikant, S.I., Hespanha, S.R. a Hegarty, M. (2010), "Cognitively Inspired and Perceptually Salient Making", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 100 No. 1, pp. 1–17.
- Fabrikant, S.I., Christophe, S., Papastefanou, G. a Maggi, S. (2012), "Emotional response to map design aesthetics", *Proceedings of GIScience 2012*, Columbus, Ohio, pp. 2–7.
- Fairbairn, D. (2006), "Measuring Map Complexity", *The Cartographic Journal*, Vol. 43 No. 3, pp. 224–238.
- Fairchild, M.D. (2005), *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons Ltd., Second., p. 417.
- Gadi, T., Benslimane, R. a Technologie, E.S. De. (1999), "Fuzzy Similarity Measure for Shape Retrieval", *Vision interface*, pp. 19–21.
- Garlandini, S. a Fabrikant, S.I. (2009), "Evaluating the Effectiveness and Efficiency of Visual Variables for Geographic Information Visualization", in Hornsby, S.K. (Ed.), *COSIT 2009*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 195–211.
- Gartner, G. a Hiller, W. (2008), "Size matters: Correlation of limited presentation media size and the degradation of cognitive representations of space", *Electronic Proceedings of 3rd International Joint Workshop on Ubiquitous, Pervasive and Internet Mapping (UPIMap) 2008*.
- Gegenfurtner, K.R. a Sharpe, L.T. (2001), *Color Vision: From Genes to Perception*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 492.
- Gilmartin, P. a Shelton, E. (1989), "Choropleth Maps on High Resolution CRTs: The Effect of Number of Classes and Hue on Communication", *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 26 No. 2, pp. 40–52.
- Goldberg, J.H. a Kotval, X.P. (1999), "Computer interface evaluation using eye movements : methods and constructs", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 24, pp. 631–645.
- Griffith, R. (2013), "ICC Version 2 or 4?", *Native Digital*, available at: <http://natedigital.co.uk/site/2013/02/icc-version-2-or-4/> (accessed 30 November 2014).
- Haklay, M. a Zafiri, A. (2008), "Usability Engineering for GIS: Learning from a Screenshot", *Cartographic Journal*, The, Vol. 45 No. 2, pp. 87–97.

- Harrie, L. a Stigmar, H. (2010), "An evaluation of measures for quantifying complexity of a map", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65 No. 3, pp. 266–274.
- Harrower, M. a Brewer, C.A. (2003), "ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Colour Schemes for Maps", *The Cartographic Journal*, Vol. 40 No. 1, pp. 27–37.
- Hegarty, M., Smallman, H.S., Stull, A.T. a Canham, M.S. (2009), "Naïve Cartography: How Intuitions about Display Configuration Can Hurt Performance", *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 44 No. 3, pp. 171–186.
- Hill, B., Roger, T. a Vorhagen, F.W. (1997), "Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 16 No. 2, pp. 109–154.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. a Van de Weijer, J. (2011), *Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures*, Oxford University Press, 1.ed., p. 560.
- Hunt, M. (2009), *The Story of Psychology*, Knopf Doubleday Publishing Group, p. 896.
- Chavez, C. a Blatner, D. (2008), *Real World Adobe Photoshop CS4 for Photographers*, Peachpit Press, 1sted., p. 600.
- Chesneau, E. (2007), "Improvement of Colour Contrasts in Maps : Application to Risk Maps", *Proceedings of 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007*, pp. 1–14.
- Christophe, S. (2008), "Creative cartography based on dialogue", *17th AutoCarto Conference (AutoCarto'08)*, Shepherdstown, WV, p. 14.
- ICC. (2014), "About ICC", International Color Consortium, available at: <http://www.color.org/abouticc.xalter> (accessed 11 December 2014).
- IRO Group Ltd. (2008), "Color calculator", EasyRGB, available at: <http://www.easyrgb.com/index.php?X=CALC> (accessed 6 November 2014).
- Ishiguro, Y. a Rekimoto, J. (2011), "Peripheral vision annotation", *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference on - AH '11*, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1–5.
- ISO 9241-11. (1998), "Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 11: Guidance on usability.", International Organization for Standardization.
- Jenny, B. a Kelso, N.V. (2007a), "Color Design for the Color Vision Impaired", *Cartographic Perspectives*, No. 58, pp. 61–67.
- Jenny, B. a Kelso, N.V. (2007b), "Designing Maps for the Colour-Vision Impaired", *Bulletin of the Society of Cartographers SoC*, Vol. 41, pp. 9–12.
- Kaňok, J. (1999), *Tematická kartografie*, Ostravská univerzita Ostrava, Ostrava, p. 304.
- Kiefer, P., Giannopoulos, I. a Raubal, M. (2013), "Where Am I? Investigating Map Matching During Self-Localization With Mobile Eye Tracking in an Urban Environment", *Transactions in GIS*, pp. 660–686.
- Klener, P. (Ed.). (1996), "Kvalitativní výzkum", *Velký sociologický slovník*, Praha: Karolinum, 1. vyd., p. 1627.
- Kröger, J., Schiewe, J. a Weninger, B. (2013), "Analysis and Improvement of the Open- StreetMap Street Color Scheme for Users with Color Vision Deficiencies", *Proceedings of the 26th International Cartographic Conference*, Dresden, Germany, p. 17.
- Kunz, M. a Hurni, L. (2011), "How to Enhance Cartographic Visualisations of Natural Hazards Assessment Results", *The Cartographic Journal*, Vol. 48 No. 1, pp. 60–71.
- Landa, E.R. a Fairchild, M.D. (2005), "Charting Color from the Eye of the Beholder", *American Scientist*, Vol. 93, pp. 436–443.
- Latecki, L.J. a Lakamper, R. (2000), "Shape similarity measure based on correspondence of visual parts", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22 No. 10, pp. 1185–1190.
- Levkowitz, H. (1997), *Color Theory and Modeling for Computer Graphics, Visualization and Multimedia Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, p. 219.
- Li, X., Çöltekin, A. a Kraak, M. (2010), "Visual Exploration of Eye Movement Data Using the", in Fabrikant, S.I. a Al., E. (Eds.), *GIScience 2010*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 295–309.

- Li, Z. a Huang, P. (2002), "Quantitative measures for spatial information of maps", *Journal of Geographical Sciences*, Vol. 16 No. 7, pp. 699–709.
- Lindbloom, B.J. (2012a), "Useful Color Equations", available at: <http://www.brucelindbloom.com/> (accessed 12 November 2012).
- Lindbloom, B.J. (2012b), "Color Difference Calculator", Useful Color Calculators and Spreadsheets, available at: <http://www.brucelindbloom.com/> (accessed 6 October 2014).
- Linhares, J.M.M., Pinto, P.D. a Nascimento, S.M.C. (2008), "The number of discernible colors in natural scenes.", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 25 No. 12, pp. 2918–24.
- Luo, M.R., Cui, G. a Rigg, B. (2001), "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000", *Color Research and Application*, Vol. 26, pp. 340–350.
- MacEachren, A.M., Brewer, C.A. a Pickle, L.W. (1998), "Visualizing Georeferenced Data Representing Reliability of Health Statistics", *Environment and Planning*, Vol. 30, pp. 1547–1561.
- Mahy, M., Van Eycken, L. a Oosterlinck, A. (1994), "Evaluation of Uniform Color Spaces Developed after the Adoption of CIELAB and CIELUV", *Color Research and Application*, Vol. 19 No. 2, pp. 105–121.
- Mann, H.B. a Whitney, D.R. (1947), "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other", *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 18 No. 1, pp. 50–60.
- Meihofer, H.J. (1969), "The utility of the circle as an effective cartographic symbol", *The Canadian Cartographer*, Vol. 6 No. 2, pp. 105–117.
- Mersey, J.E. (1990), "Colour and Thematic Map Design : The Role of Colour Scheme and Map Complexity in Choropleth Map Communication", *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 27 No. 3.
- Murray, I.J., Parry, N.R.A. a McKeefry, D.J. (2012), "Sex-related differences in peripheral human color vision : A color matching study", Vol. 12, pp. 1–10.
- Neumann, J. (1994), "The topological information content of a map: an attempt at a rehabilitation of information theory in cartography", *Cartographica*, Vol. 31 No. 1, pp. 26–34.
- Ohta, N. a Robertson, A.R. (2005), *Colorimetry: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., p. 354.
- Olson, J.M. a Brewer, C.A. (1997), "An Evaluation of Color Selections to Accommodate Map Users with Color-Vision Impairments", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 87 No. 1, pp. 103–134.
- Ooms, K., Maeyer, P. De, Fack, V., Assche, E. Van a Witlox, F. (2012), "Investigating the Effectiveness of an Efficient Label Placement Method Using Eye Movement Data", *The Cartographic Journal*, Vol. 49 No. 3, pp. 234–246.
- Opach, T. (2010), "Evaluating the Usability of Cartographic Animations With Eye-Movement Analysis", *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference*, Paris, France, p. 11.
- Pascale, D. (2003), "A Review of RGB Color Spaces: from xyY to R'G'B."
- Pászto, V., Brychtová, A. a Marek, L. (2015), "On Shape Metrics in Cartographic Generalization: A Case Study of the Building Footprint Geometry", in Brus, J., Vondrakova, A. a Vozenilek, V. (Eds.), *Modern Trends in Cartography, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer International Publishing, Cham, Lecture No., doi:10.1007/978-3-319-07926-4.
- Pernice, K. a Nielsen, J. (2009), *Eyetracking Methodology: How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking*, NN Group, Fremont, USA, p. 163.
- Phillips, R.J. a Noyes, L. (1982), "An Investigation of Visual Clutter in the Topographic Base of a Geological Map", *Cartographic Journal*, The, Vol. 19 No. 2, pp. 122–132.
- Pili, F. (2013), "Web browser color management guide", Cameratico, available at: <http://cameratico.com/guides/web-browser-color-management-guide/> (accessed 17 November 2014).
- Polishchuk, V. a Vihavainen, A. (2010), "Periodic Multi-labeling of Public Transit Lines", in Fabrikant, S.I., Reichenbacher, T., Kreveld, M. and Schlieder, C. (Eds.), *Geographic Information Science, LNCS Vol. 6292, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, LNCS., Vol. 6292, pp. 175–188.

- Poole, A. a Ball, L.J. (2005), *Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future*, (Ghaoui, C., Ed.) *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, Idea Group, Inc, Pennsylvania, p. 13.
- 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, pp. 705–712.
- Popelka, S. a Brychtova, A. (2013), "Eye-tracking Study on Different Perception of 2D and 3D Terrain Visualisation", *Cartographic Journal*, The, Vol. 50 No. 3, pp. 240–246.
- Preiss, M. (2005, November), "Psychologické testy a realita všedního dne", *Psychologie dnes*, available at: <http://www.psychodiagnostika.cz/index.php?akce=preiss>.
- R Core Team. (2013), "R: A Language and Environment for Statistical Computing", R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: <http://www.r-project.org/>.
- Robertson, A.R. (1990), "Historical development of CIE recommended color difference equations", *Color Research & Application*, Vol. 15 No. 3, pp. 167–170.
- Robinson, A.H. (1952), *The Look of Maps: An Examination of Cartographic Design*, ESRI Press, 2010, Redlands, California, p. 128.
- Robinson, A.H., Morrison, J.L., Muehrcke, P.C., Kimerling, A.J. and Guptill, S.C. (1995), *Elements of Cartography*, Wiley, 6th ed., p. 688.
- Rubin, J. a Chisnell, D. (2008), *Handbook of Usability Testing: Howto Plan, Design, and Conduct Effective Tests*, Wiley, Indianapolis, 2nd ed., p. 384.
- Russo, P., Pettit, C., Çöltekin, A., Imhof, M., Cox, M. a Bayliss, C. (2014), "Understanding Soil Acidification Process Using Animation and Text: An Empirical User Evaluation With Eye Tracking", in Buchroithner, M., Prechtel, N. and Burghardt, D. (Eds.), *Cartography from Pole to Pole: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 431–448.
- Salvucci, D.D. a Goldberg, J.H. (2000), "Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols", *Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications ETRA '00*, ACM Press, New York, USA, pp. 71–78.
- SensoMotoric Instruments. (2013a), "SMI Experiment Center™", available at: <http://www.smivision.com/en/gaze-and-eye-tracking-systems/products/experiment-center-software.html>.
- SensoMotoric Instruments. (2013b), "SMI BeGaze™", available at: <http://www.smivision.com/en/gaze-and-eye-tracking-systems/products/begaze-analysis-software.html>.
- Shannon, C.E. (1948), "A Mathematical Theory of Communication", *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
- Sharma, G., Wu, W. a Dalal, E.N. (2005), "The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations", *Color Research & Application*, Vol. 30 No. 1, pp. 21–30.
- Schnürer, R., Sieber, R. a Çöltekin, A. (2014), "The Next Generation of Atlas User Interfaces: A User Study with Digital Natives", in Vondráková, A., Brus, J. and Voženílek, V. (Eds.), *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014*, Springer, Lecture No., pp. 23–36.
- Sippel, K., Thomas, K., Fuhl, W., Schievelbein, G. a Rosenberg, R. (2015), "EyeTrace2014: Eyetracking Data Analysis Tool", *HEALTHINF 2015*, Vol. 1, p. 6.
- Slocum, T.A., McMaster, R.B., Kessler, F.C. a Howard, H.H. (2008), *Thematic Cartography and Geovisualization (3rd Edition)*, Prentice Hall, p. 576.
- Steinrücken, J. a Plümer, L. (2013), "Identification of Optimal Colours for Maps from the Web", *The Cartographic Journal*, Vol. 50 No. 1, pp. 19–32.
- Sternberg, R. (2002), *Kognitivní psychologie*, Portál, Praha, 1. vyd., p. 636.
- Stigmar, H. (2010), *Making 21st Century Maps Legible - Methods for Measuring and Improving the Legibility and Usability of Real-Time Maps*, Lund University, available at: <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=12683&postid=1702178> (accessed 18 October 2012).

- Stokes, M., Anderson, M., Chandrasekar, S. a Motta, R. (1996), "Proposal for a Standard Default Color Space for the Internet: sRGB", Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, pp. 238–245.
- Sukhov, V.I. (1970), "Application of information theory in generalization of map contents", International yearbook of cartography, pp. 41–47.
- Szafir, D.A., Stone, M. a Gleicher, M. (2014), "Adapting Color Difference for Design", 22nd Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, Society for Imaging Science and Technology, pp. 228–233.
- Štěrba, Z. (2012), Objektivizace a optimalizace hodnocení kartografické symboliky pro mapy v krizovém řízení, Disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, p. 168.
- The LimeSurvey project. (2011, April 24), "LimeSurvey - the free and open source survey software tool", Carsten Schmitz, available at: <https://www.limesurvey.org/> (accessed 12 June 2013).
- Tobler, W. (1994), "Introductory Comments on Information Theory and Cartography", Entropy, No. 3, pp. 2–4.
- Tufte, E.R. (2008), *Envisioning Information.*, Applied Statistics, Graphic Press, Cheshire, Connecticut, 12th ed., Vol. 41, p. 126.
- Vávra, A. (2015), Geoinformační technologie ve fenologickém výzkumu a mapování, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Terra Noti., p. 144.
- Veltkamp, R. (2006), Properties and performance of shape similarity measures, (Vladimir Batagelj, Hans-Hermann Bock, A.F. and A.Ž., Ed.) *Data Science and Classification*, available at: <http://www.springerlink.com/index/Q241H5826H86146M.pdf> (accessed 13 October 2011).
- Voßkühler, A. (2013), "OGAMA (OpenGazeAndMouseAnalyzer)", Freie Universität Berlin, available at: <http://www.ogama.net/>.
- Voženílek, V. (2004), *Aplikovaná kartografie I.: tematické mapy*, Univerzita Palackého v Olomouci, p. 187.
- Voženílek, V. a Kaňok, J. (2011), *Metody tematické kartografie*, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, p. 216.
- W3C. (1995), "Specification of sRGB", Graphics on the Web, available at: <http://www.w3.org/Graphics/Color/srgb> (accessed 25 April 2012).
- W3C. (2015), "Color Management: the color-correction property", CSS Color Module Level 4, available at: <http://dev.w3.org/csswg/css-color/#propdef-color-correction> (accessed 5 January 2015).
- Waggoner, T.L. (2014), "PseudoIsochromatic Plate (PIP) Color Vision Test 24 Plate Edition", Color Vision Testing, available at: <http://colorvisiontesting.com/ishihara.htm> (accessed 12 June 2014).
- Wagner, F. a Wolf, A. (1995), "Map Labeling Heuristics: Provably Good and Practically Useful", Proceedings of the eleventh annual symposium on Computational geometry, pp. 109–118.
- Weninger, B. (2013), "The Effects of Colour on the Interpretation of Traffic Noise in Strategic Noise Maps", Proceedings of the 26th International Cartographic Conference, Dresden, Germany, p. 11.
- Werman, M. (2012), "Improving Perceptual Color Difference using Basic Color Terms", Computer Research Repository, pp. 1–14.
- Whitney, D. a Levi, D.M. (2011), "Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition.", Trends in cognitive sciences, Vol. 15 No. 4, pp. 160–8.
- Wilkinson, D. a Birmingham, P. (2003), *Using Research Instruments: A Guide for Researchers*, RoutledgeFalmer, p. 190.
- Witthoft, N., Winawer, J., Wu, L., Frank, M., Wade, a a Boroditsky, L. (2003), "Effects of language on color discriminability", doi:10.1167/3.9.711.
- WorkWithColor.com. (2013), "Color Space and Color Gamut", available at: <http://www.workwithcolor.com/color-space-and-gamut-8531.htm> (accessed 10 December 2013).
- X-Rite. (2012), "How Color Notation Works", Official Site of Munsell Color, available at: <http://munsell.com/about-munsell-color/how-color-notation-works/> (accessed 13 February 2012).
- Yang, Y., Ming, J. a Yu, N. (2012), "Color Image Quality Assessment Based on CIEDE2000", Advances in Multimedia, Vol. 2012, pp. 1–6.

SUMMARY

The main objective of the dissertation thesis was to investigate the effect of color distance on the readability of visualized spatial information in the map. To achieve the goal, it was necessary to study the issue of human perception of the color, determine methods of color description and choose the most appropriate method for calculating the color distance metric.

There are three main aims of the thesis.

Firstly, author aims to examine current practices that are applied by experienced cartographers while map making. The emphasis was put in the procedures associated with using and reproducing colors on maps. Further the evaluation of the color management systems in various software (GIS, cartographic, DTP, web browsers and experimental) was performed. Finally the analysis of the ColorBrewer 2.0 tool was done in order to find out values of color distances, which are commonly, however unconsciously, applied on maps.

In the second part a qualitative research was performed to evaluate the effect of the color distance on the map readability. Eye-tracking and questionnaire were used to determine efficiency and strategy of participants. In total six experimental studies were performed:

1. *Labels*: Investigating the influence of color distance and font size on the map labelling readability
2. *Schemes*: Investigating the influence of color distance between classes of sequential and qualitative color schemes on their distinguishability
3. *Euclid*: Investigating the influence of spatial and color distance between map symbols on their distinguishability
4. *Order*: Investigating the influence of the legend position and the order of sequential schemes classes on the map readability
5. *Optimization*: Optimizing the color distance in sequential color schemes
6. *Hue*: Investigating the influence of sequential color schemes hue

Results of presented experimental studies were published in English in following articles:

Brychtová, A. and Çöltekin, 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*, published online ahead an issue

Brychtová, A. (2014), "Exploring the influence of colour distance and legend position on choropleth maps readability", in Brus, J., Vondráková, A. and Voženílek, V. (Eds.), *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014, Lecture No.*, pp. 315–326.

Brychtová, A. and Vondráková, A. (2014), "Green versus Red: Eye-tracking evaluation of sequential colour schemes", *SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings Volume III, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria*, p. 8.

The third thesis objective was to design and develop an application for generating sequential color schemes for choropleth maps. User can manipulate colors, number of classes of the scheme and visual difference between them by applying color distance steps defined by CIEDE2000 method. The Sequential Color Scheme Generator is available at <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

Poděkování

- ... to Arzu Çöltekin for giving me the opportunity to learn from her, for introducing me to the cartographic society, for her ideas, friendly advices and cooperation and for making me feel to be a bit more important and competent,
- ... Standovi Popelkovi za všechnu jeho konstruktivní i nekonstruktivní kritiku i povzbuzení v průběhu celých pěti let a za hudební produkci (teď už je mi hej),
- ... Jitce Doležalové za matematizaci mých nápadů, exemplární ochotu a kamarádství,
- ... panu profesoru Voženílkovi za cenné podněty a připomínky k disertační práci,
- ... všem anonymním respondentům mých experimentů za jejich pohledy,
- ... kamarádům a kolegům, kteří kolem mého života postavili skleník, a dali mi tak pocit, že na světě jsou jen úžasní, milí a inteligentní lidé,
- ... projektům NeoCartoLink a InDog a lidem kolem za příležitost poznat, jak to chodí ve světě,

a samozřejmě taky

- ... mamince za to, že ze mě vychovala to, co ze mě vychovala,
- ... babi a dědovi za podporu, takovou tu všeobecnou, ale velkou,
- ... Viktorovi za to, že mi průběžně a zcela nepřímou připomínal, že moje akademické problémy jsou pouze akademické :-)
- ... a taky Jenny za to, že mi nedovolila ztloustnout.

PŘÍLOHY

Příloha 1. Dotazník studie *Experiences*.

Příloha 2. Vybrané stimuly experimentu *Labels*

Příloha 3. Vybrané stimuly experimentu *Schemes*

Příloha 4. Vybrané stimuly experimentu *Euclid*

Příloha 5. Vybrané stimuly experimentu *Order*

Příloha 6. Vybrané stimuly experimentu *Optimalization*

Příloha 7. Vybrané stimuly experimentu *Hue*

Příloha 8. DVD1 (volná příloha)

Příloha 9. DVD2 (volná příloha)

Struktura DVD1

1_Dotaznik

Struktura dotazníku studie Experiences ve formátu .pdf

2_Stimuly

Experimentální stimuly ve formátu .jpg

exp1-Labels

exp2-Schemes

exp3-Euclid

exp4-Order

exp5-Optimalization

exp6-Hue

3_SequentialColorSchemeGenerator

Zdrojový kód webového nástroje

4_Text

Textová část disertační práce ve formátu .pdf

Struktura DVD2

exp_1.experiment

BeGaze projekt experimentu Labels

exp_2_3.experiment

BeGaze projekt experimentů Schemes a Euclid

exp_4_5_6.experiment

BeGaze projekt experimentů Order, Optimalization a Hue

Colours in modern cartography

Dear friends,

I would like to kindly ask you to participate on my PhD research by filling a following questionnaire, which is aimed at finding the current state of art in using colours in cartography.

The questionnaire will result in one chapter of my dissertation, which aims to describe how cartographers deals with colours on their maps. No extensive analysis of hundreds responses, no complex charts, just views and ideas of concrete people who really creates maps.

The questionnaire won't (hopefully) take more than 30 minutes of your life.

Questions are not mandatory, but I would be grateful, if you could answer all of them :)

I also would like to specially encourage you to use 'comment' fields as much as you can (even to tell seemingly obvious and unimportant note). It would allow me to understand your ideas more in deep.

Million thanks in advance,

Alzbeta Brychtova

Palacky University Olomouc
Department of Geoinformatics
alzbeta.brychtova@gmail.com

A. About you

A1. For what purpose you are creating maps?

Please report an approximate proportion of your employment. Sum of both s should be 100% :-). I know that between academic and commercial is in some cases tigh difference. I would say, that maps reporting results of scientific research should be classified as 'academic'. Everything what ordinary people can buy is 'commercial'.

	0%	20%	40%	60%	80%	100%
academic	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
commercial	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A2. Could you specify the form of maps you are producing?

By your own words. It is enough to provide for example 'I am mostly focused on school atlases production, but sometimes I am asked to create tourist maps' (the more detailed answer the more happy I'll be :))

B. Your working environment

Following tasks are based on your knowledge of Colour Management.

Colour management it's not just some vague manipulating with colors in order to make them look good. It is a complex set of procedures that will ensure that colors look the same on various devices and medias.

You can check Wiki to see, if your perception of 'Colour management' was correct
http://en.wikipedia.org/wiki/Color_management

If you have no clue of Colour Management, never mind - go on! I appreciate your contribution even so :-)

B1. Could you evaluate your knowledge about Colour Management?

Report the state of your knowledge before you read the Wiki page :)

1 2 3 4 5

No knowledge at all I am expert!

B2. Do you think is it important, that cartographers pay attention to precise colour management?

- Yes, colour management is absolutely necessary
- No, colour management is not important for producing maps
- It depends...
- I cannot say, I don't know what colour management encompasses
- J iné:

B3. Could you give a reason to your above statement?

Why do you think it is necessary to follow rules of colour management? Or why do you think colour management is not important for cartographers? Even if your answer was uncertain, could you tell what are your ideas about colour management...

B4. Do you personally calibrate your screen?

(screen on which you are gazing while creating maps)

- Yes, I do.
- No, I do not.
- J iné:

B5. Could you name the software which you use to finish a look (especially colours :-)) of your maps?

What is the software where you see the final version of the map and where you can say 'Yes, now it looks perfect, lets publish!' (e.g. I am using ArcGis to do the layout, but final edits I do in CorelDraw)

C. Your workflow

C1. What is the media of maps you are creating?

Please report an approximate proportion of maps you create according to the media type. Sum both should be 100% :-). Disregard special kind of maps such as tactile, 3D prints, etc.

	0%	20%	40%	60%	80%	100%
digital	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
printed	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

C2. How do you ensure, that your DIGITAL maps' colours appear the same on your screen and also users' screens?

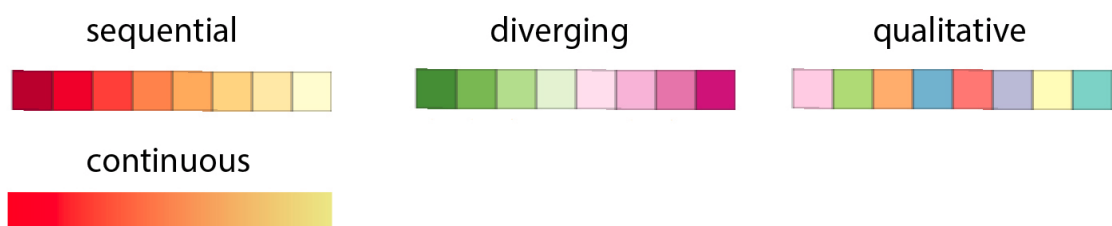
(Answer only if you do some digital maps) Please, try to describe how you can guarantee that colours of your maps are distinguishable not just on your screen, but also on your users' screen.

C3. How do you ensure, that your PRINTED maps' colours appear the same on your screen and also on the paper?

(Answer only if you do some printed maps) Please, try to describe how you can guarantee that colours of your maps are distinguishable not just on your screen, but also on the paper! Do you involve ICC profiles?

D. Designing colour schemes

I am particularly interested on process of designing colour schemes, rather than other map features and symbols, thus following questions are targeted on and only sequential, diverging and qualitative COLOUR SCHEMES. (If you are not sure about terminology, see the figure below and check types of colour schemes...)



D1. When designing colour schemes do you use ColorBrewer 2.0?

<http://colorbrewer2.org/> (if you use Color Brewer just rarely (once in your life, or so) specify it in the 'other' field)

- yes, quite often
- no, never
- I let inspire myself, but do not use entire colour schemes specification
- Jiné:

D2. Do you use any other colour swatch to help yourself design colour schemes?

Please specify it with your own words (e.g. I am using colours provided by ArcMap styles, or I am following certain standards of the national mapping agency, etc.)

D3. What is the maximum number of shades you apply to your colour schemes?

Forget all the rules and theory and be honest :) What is the maximum colour shades you have ever used for colour scheme and which you also think that is acceptable. But please do not consider outliers: if you made a map of the 150 categories once in your life and you do not think it is usable, you can note it as a special comment below, not here :)

	les than 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	more than 15
sequential schemes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
diverging schemes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
qualitative schemes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

D4. Any comment to the above question?

If you found the question about maximum number of shades confusing, or you cannot answer it because of some specific reason, you can express your attitude towards the number of colour schemes categories below.

D5. Have you ever created map with 'continuous' colour scheme (no classes) ?

Consider only those which have been published.

- Yes
- No

D6. Do you purposely optimise your maps for users who are suffering by colour vision distortion (colour blindness)?

- yes
- no
- Jiné:

E. You and science

E1. Could you name scientific articles (NOT books, please) whose results you have applied while designing your maps

If you cannot name any article related to colour and its perception, you can note even different fields of map design. Please, focus on articles only, do not note cartographic textbooks (e.g. Slocum, Dent,...) if you have never applied the results of the articles, please mention it.

E2. What influenced your ability to create and design a map?

How would you rate the valuables of sources of your present state of knowledge: 1 - no value for me, 5 - this is the most valuable source of my present knowledge

	1	2	3	4	5
High school education	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
University education (pregradual)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
University education (postgradual)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cartographic textbooks	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Scientific articles related to usability and cognition	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
My own practice (trial and error)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

E3. What kind of research related to the design of maps you would like to see?

What would you think theoretical cartographers should focus on, that would be applicable in a practical cartography? Is there any problem related to colors (and also design of maps in general) that will not let you sleep?

E4. What do you think that would contribute to a higher usability of research findings (from cognitive cartography and users issues) in commercial cartography?

You know, sometimes I feel, that cartographic research and map making are two different worlds. I would like to know how to connect these worlds...

F. This is all, but...

F1. Is there something I haven't asked you, but I should?

Good news - the penultimate question is here! :-) The questionnaire definitely did not cover all unanswered questions of modern cartography. Do you feel is there something else, what you consider an important issue for using colours on maps and I haven't asked you for your opinion? Please tell me... You can also use this text box to express whatever is just on your mind.

F2. Could you please give your name and affiliation (institution name)?

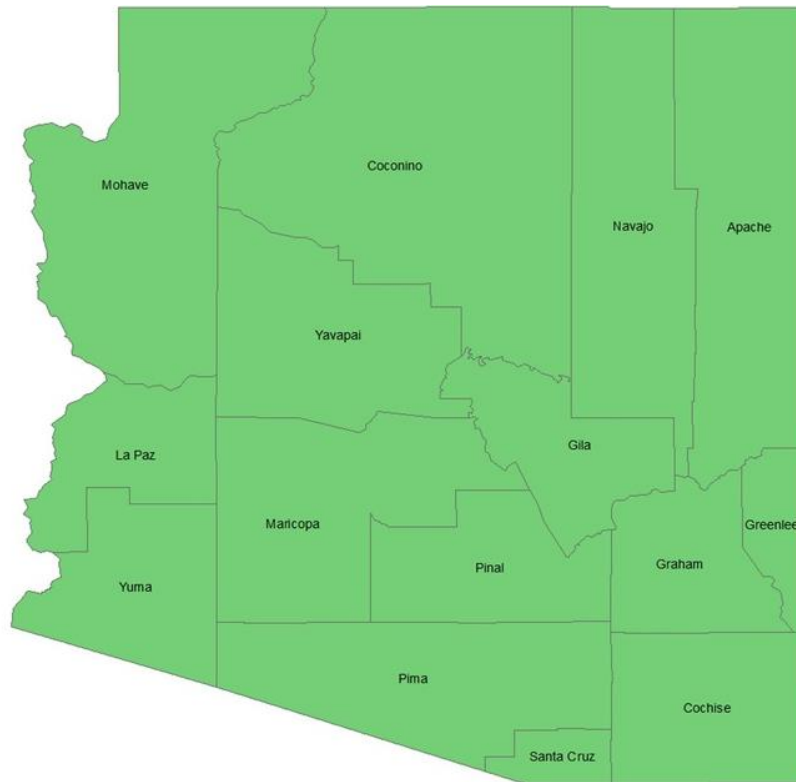
Your name will not be misused. See the last question.

F3. Do you agree that I publish your name on the list of participants of this questionnaire?

I would appreciate if I could refer to your name and company/institution. Your name will only appear on the list of persons questioned, so I could prove that the results of this survey are based on responses of real and experienced cartographers. I promise that I will not associate your name with a concrete answer.

- Yes, I agree (I don't mind to be named on the list of participants)
- No, I don't want to be named

Příloha 2/1 - Experiment Labels



Úkol: Najdi Coconino.

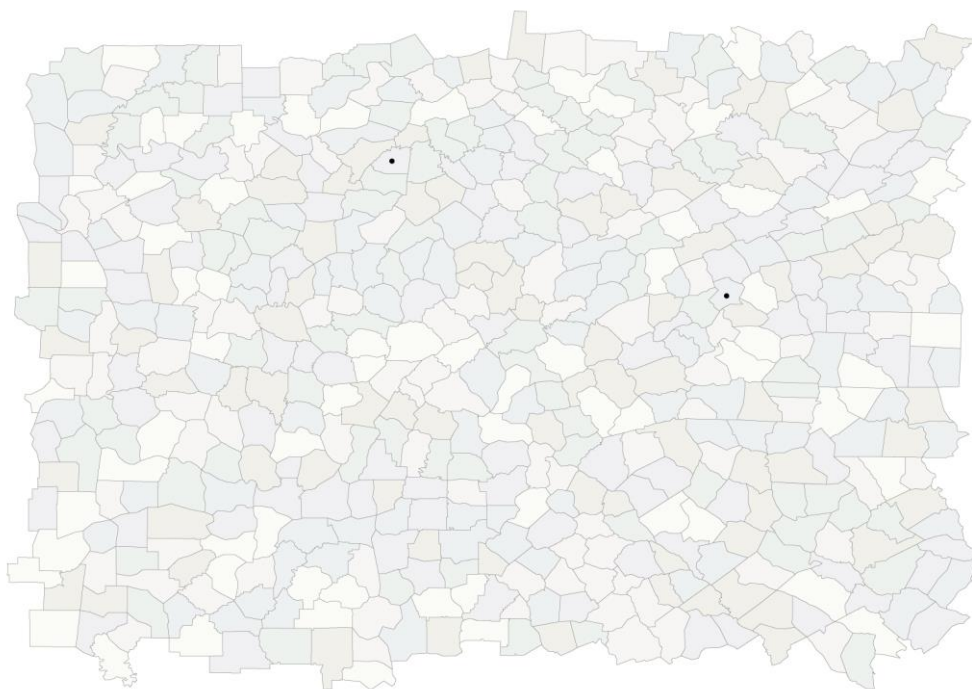
Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem $\Delta E_{00} = 60$, velikost fontu 8pt



Úkol: Najdi Campbell.

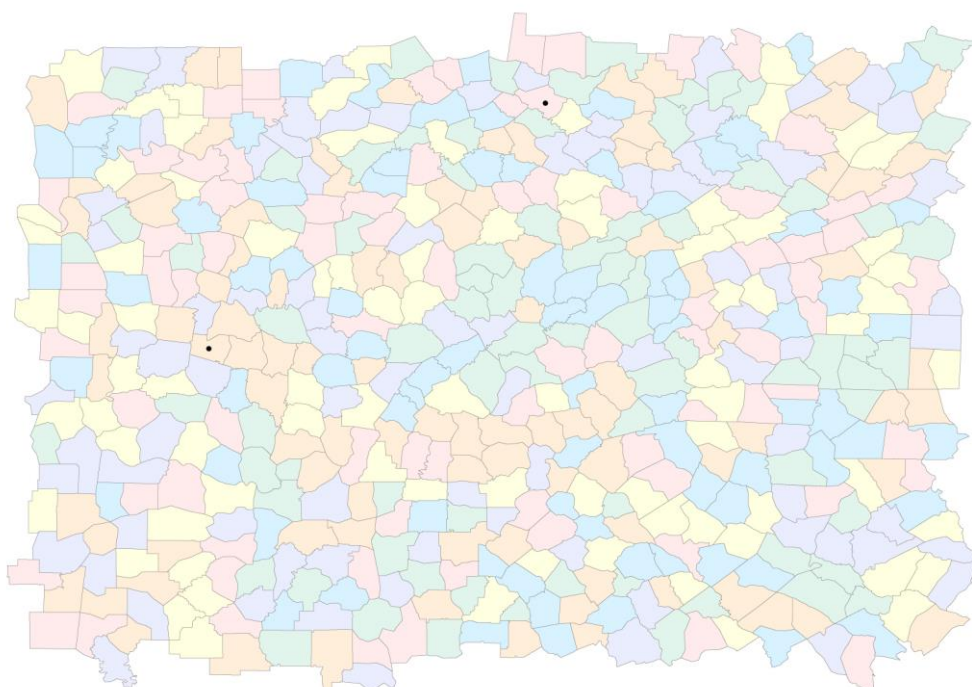
Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem $\Delta E_{00} = 20$, velikost fontu 11pt

Pozn.: Velikost ukázek je přizpůsobena podle stránky a neodpovídá skutečným velikostem. Barevnost je pouze orientační.



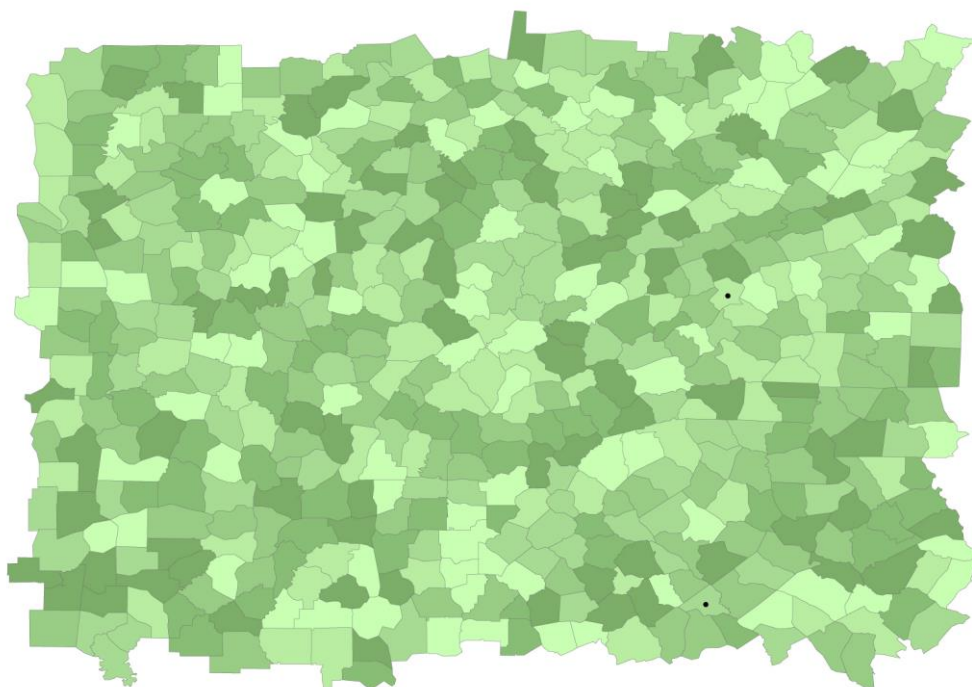
Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testovaná podmínka: barevná vzdálenost mezi kategoriemi použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 2$.



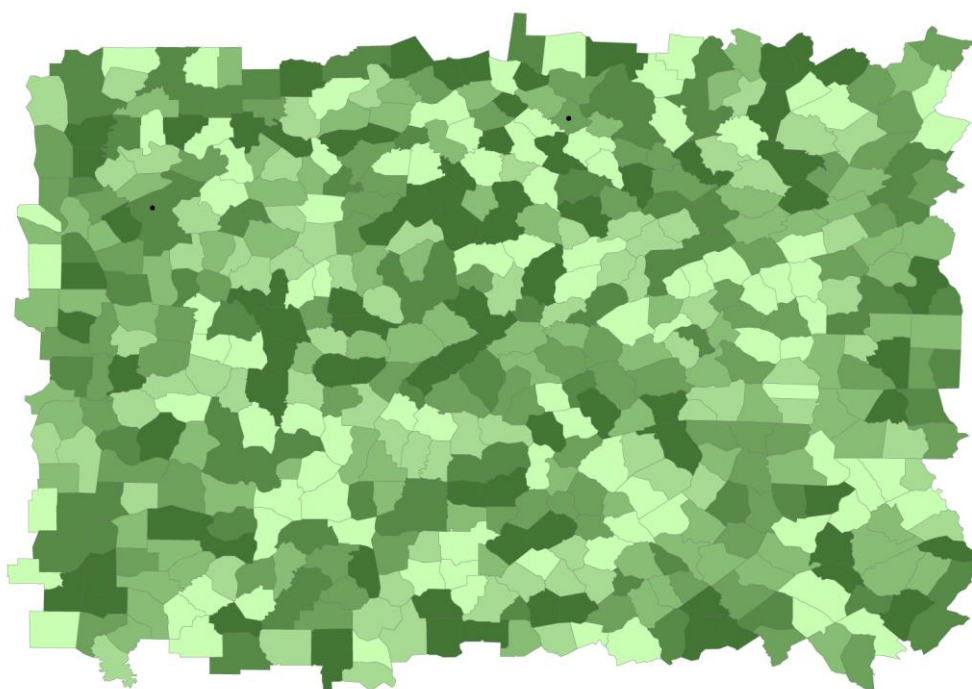
Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testovaná podmínka: barevná vzdálenost mezi kategoriemi použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 10$.



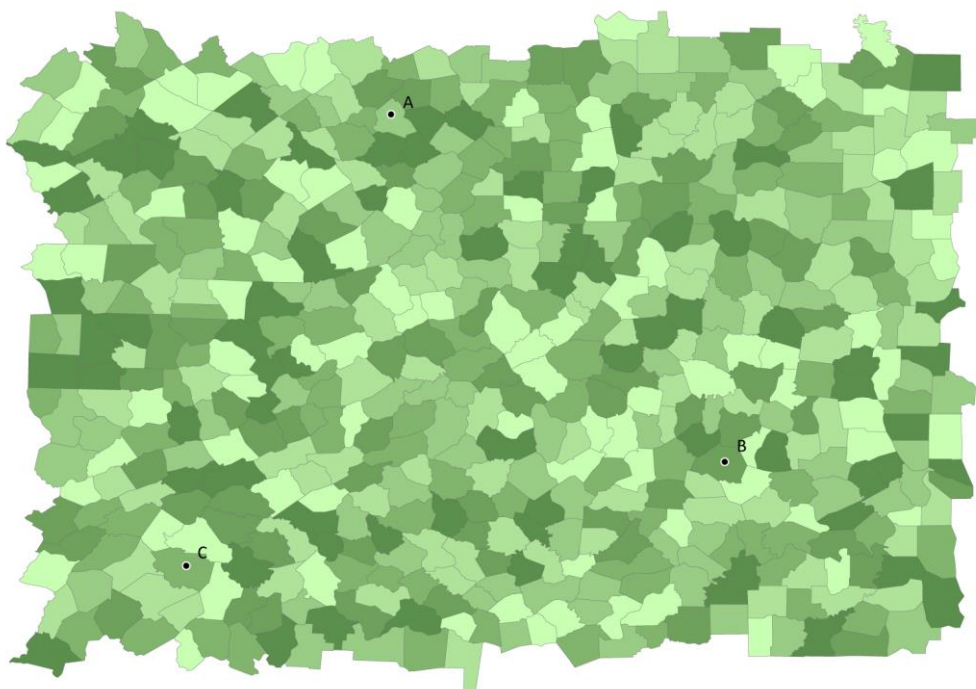
Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testovaná podmínka: barevná vzdálenost mezi intervaly použitého sekvenčního schématu $\Delta E_{00} = 4$.



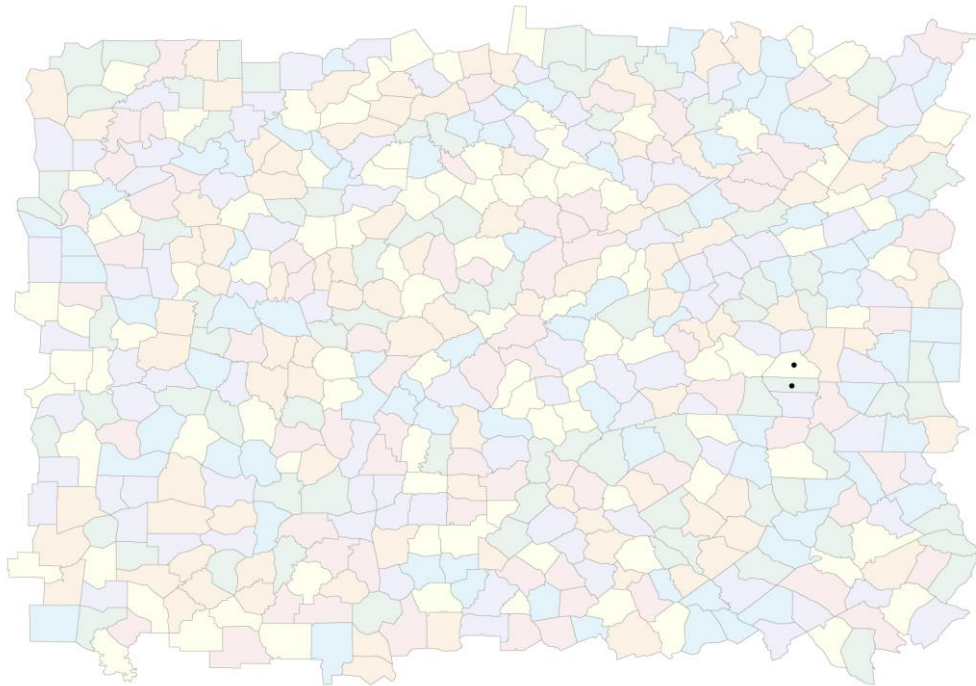
Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testovaná podmínka: barevná vzdálenost mezi intervaly použitého sekvenčního schématu $\Delta E_{00} = 8$.



Úkol: Srovnej tři areály označené tečkou a seřaď je od nejsvětější po nejtmavší.

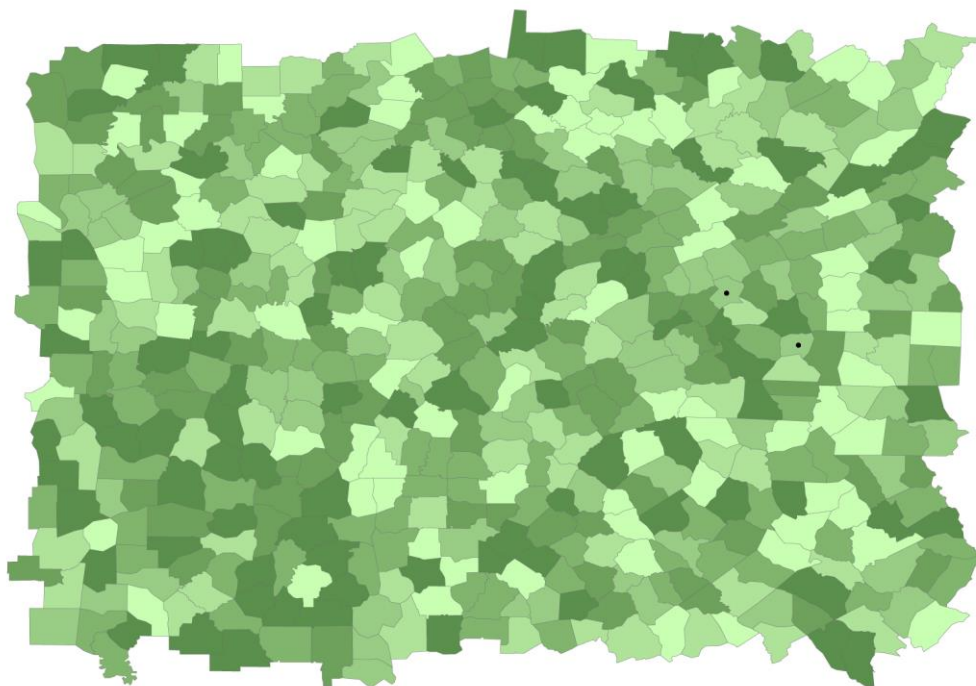
Testovaná podmínka: barevná vzdálenost mezi intervaly použitého sekvenčního schématu $\Delta E_{00} = 6$.



Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testované podmínky: prostorová vzdálenost mezi označenými areály $\Delta d = 1$,

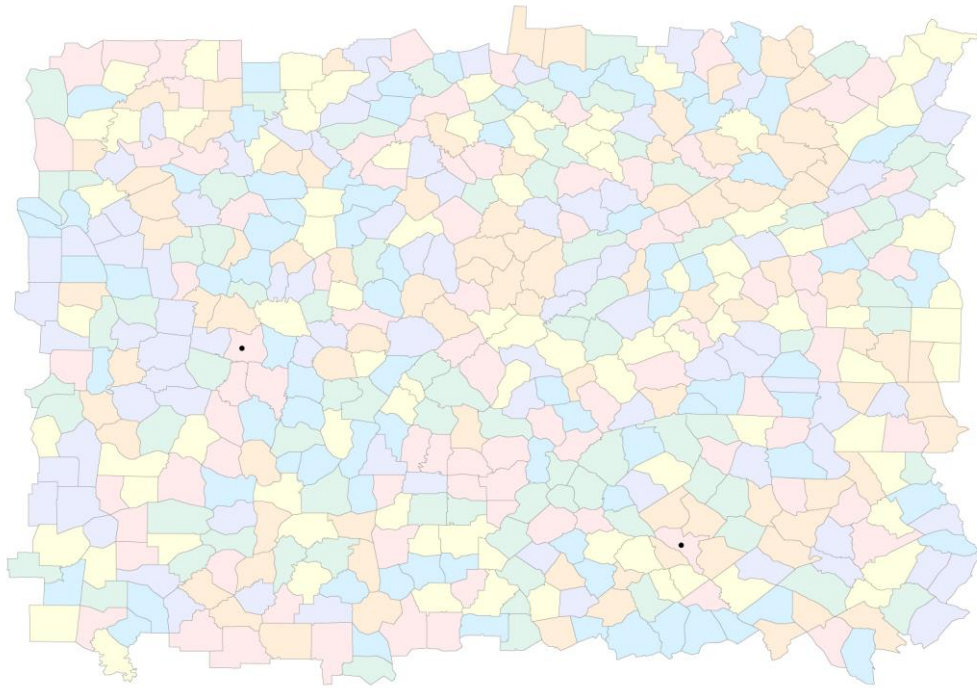
barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 4$.



Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

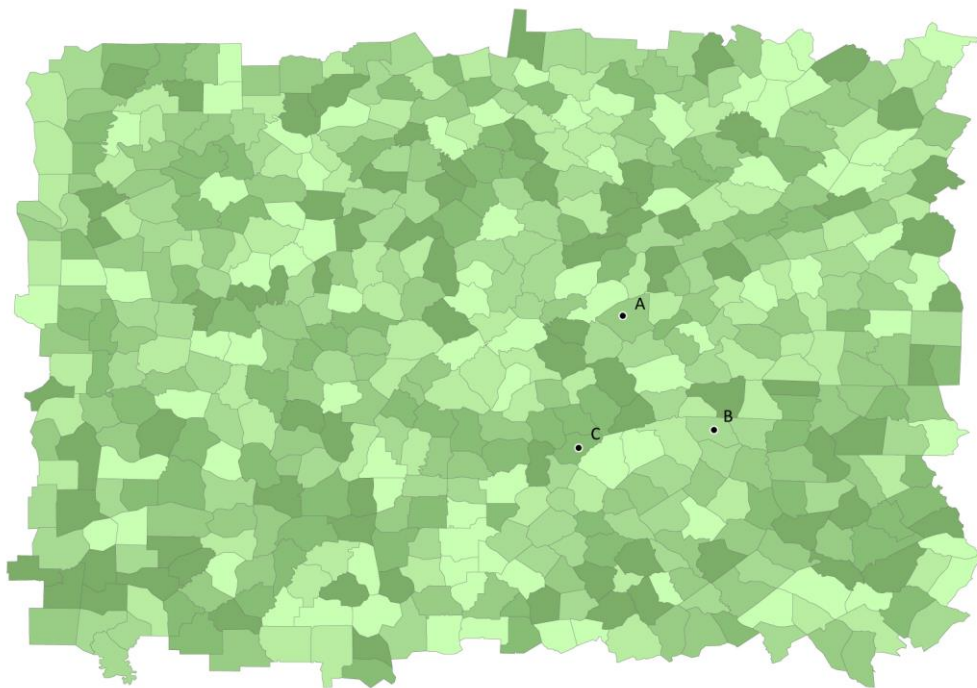
Testované podmínky: prostorová vzdálenost mezi označenými areály $\Delta d = 2$,

barevná vzdálenost mezi intervaly použitého sekvenčního schématu $\Delta E_{00} = 6$.



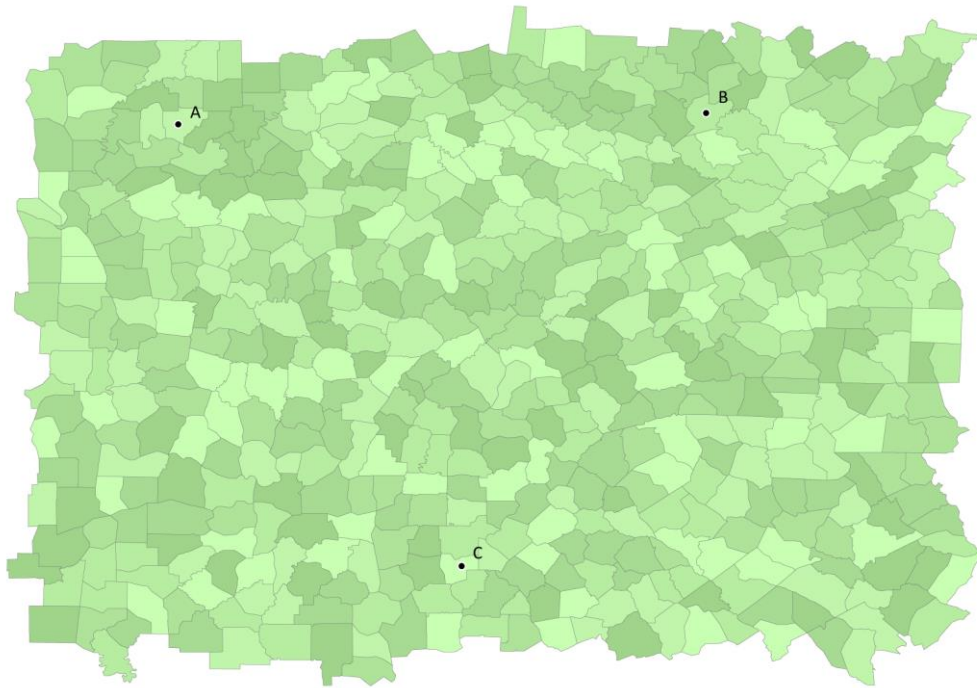
Úkol: Srovnej areály označené tečkou a rozhodni, zda jsou stejně barevné.

Testované podmínky: prostorová vzdálenost mezi označenými areály $\Delta d = 3$,
barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 10$.



Úkol: Srovnej tři areály označené tečkou a seřaď je od nejsvětlejší po nejtmaší.

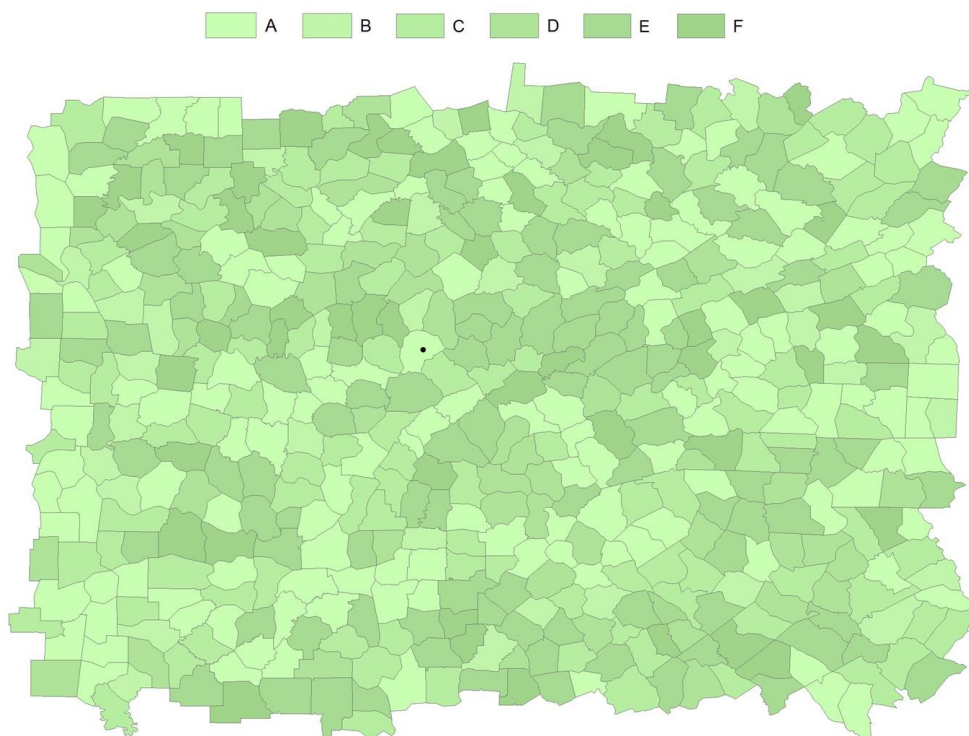
Testované podmínky: prostorová vzdálenost mezi označenými areály $\Delta d = 2$,
barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 4$.



Úkol: Srovnej tři areály označené tečkou a seřaď je od nejsvětější po nejtmaší.

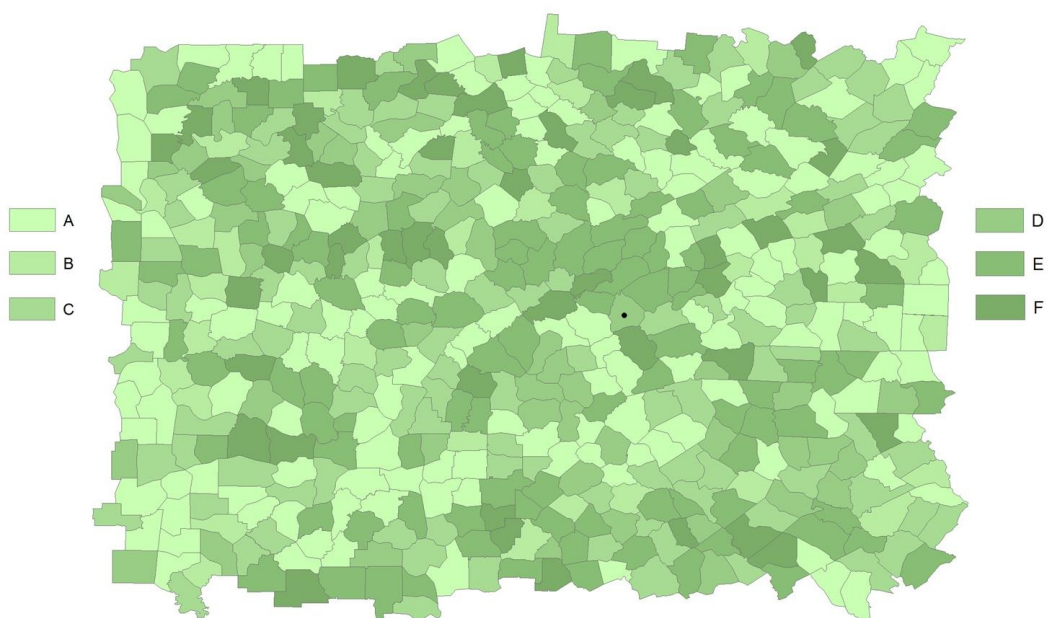
Testované podmínky: prostorová vzdálenost mezi označenými areály $\Delta d = 3$,

barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 2$.



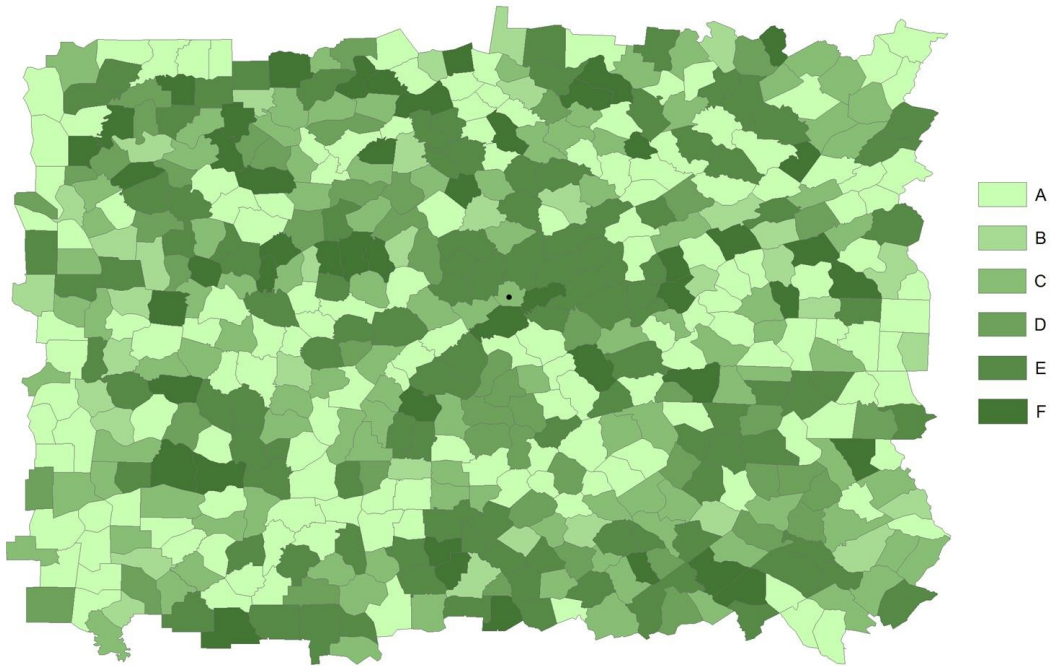
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: legenda typu I., barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 2$, pořadí určovaného intervalu A.



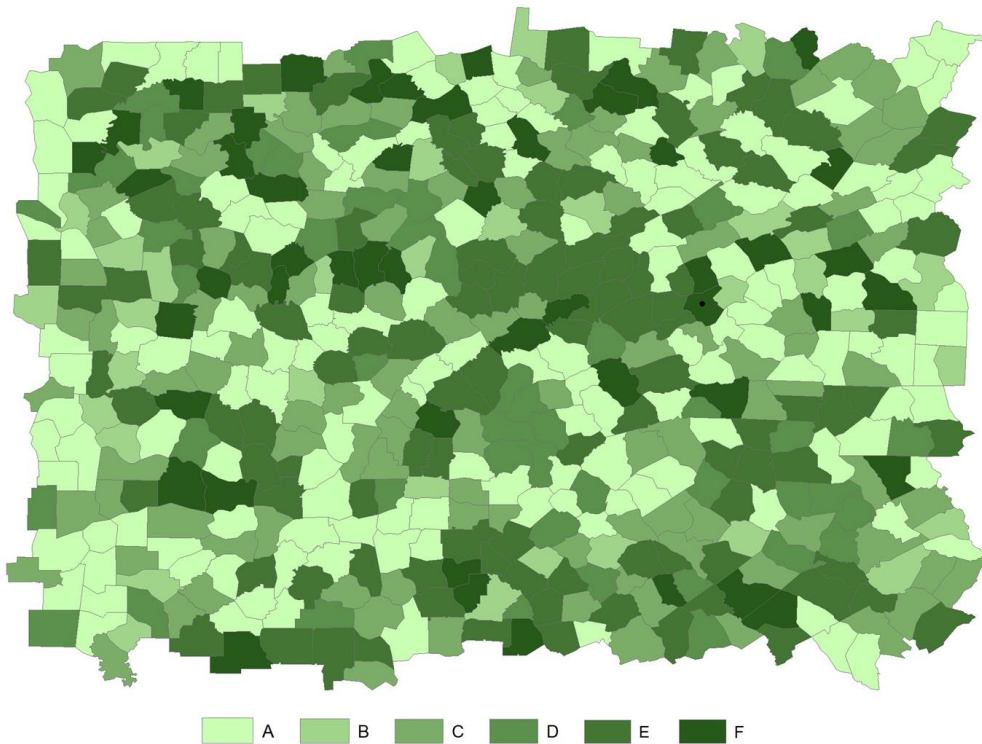
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: legenda typu V., barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 4$, pořadí určovaného intervalu D.



Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: legenda typu IV., barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 8$, pořadí určovaného intervalu C.



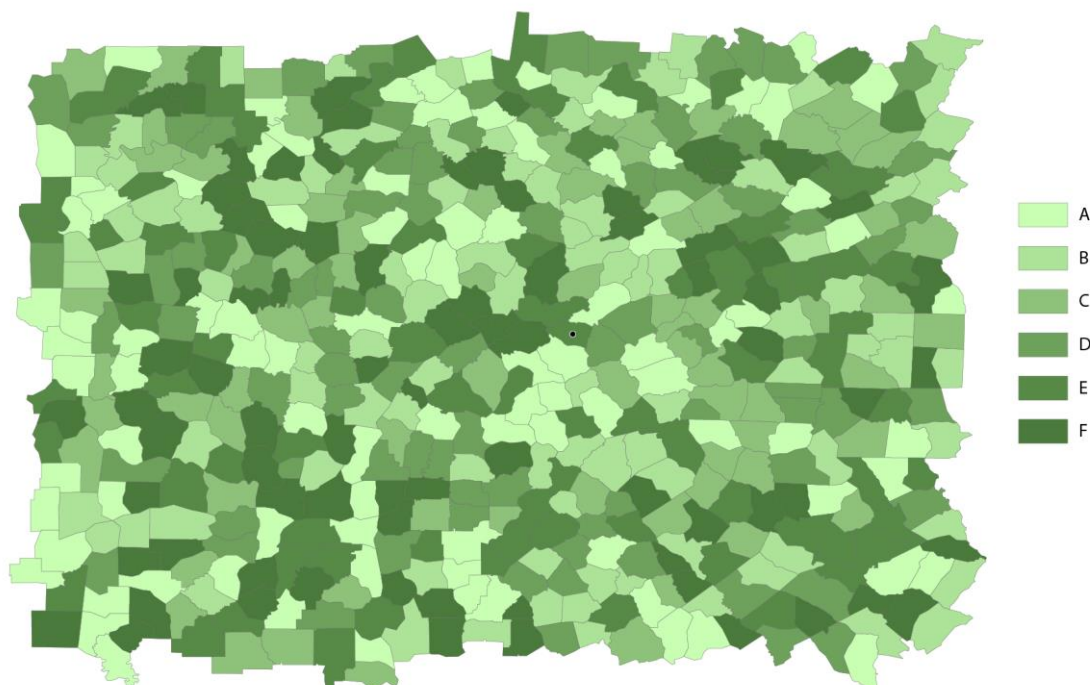
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: legenda typu II., barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 10$, pořadí určovaného intervalu F.



Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 2-4-6-8-10-12$, pořadí určovaného intervalu A.



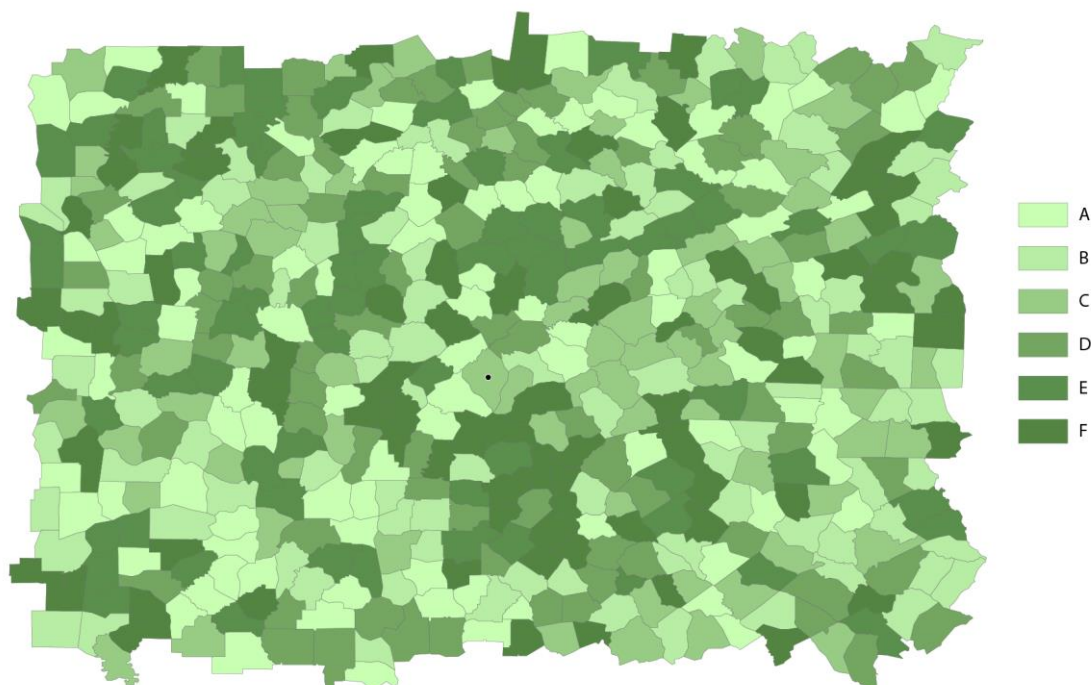
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 6-8-10-8-6$, pořadí určovaného intervalu E.



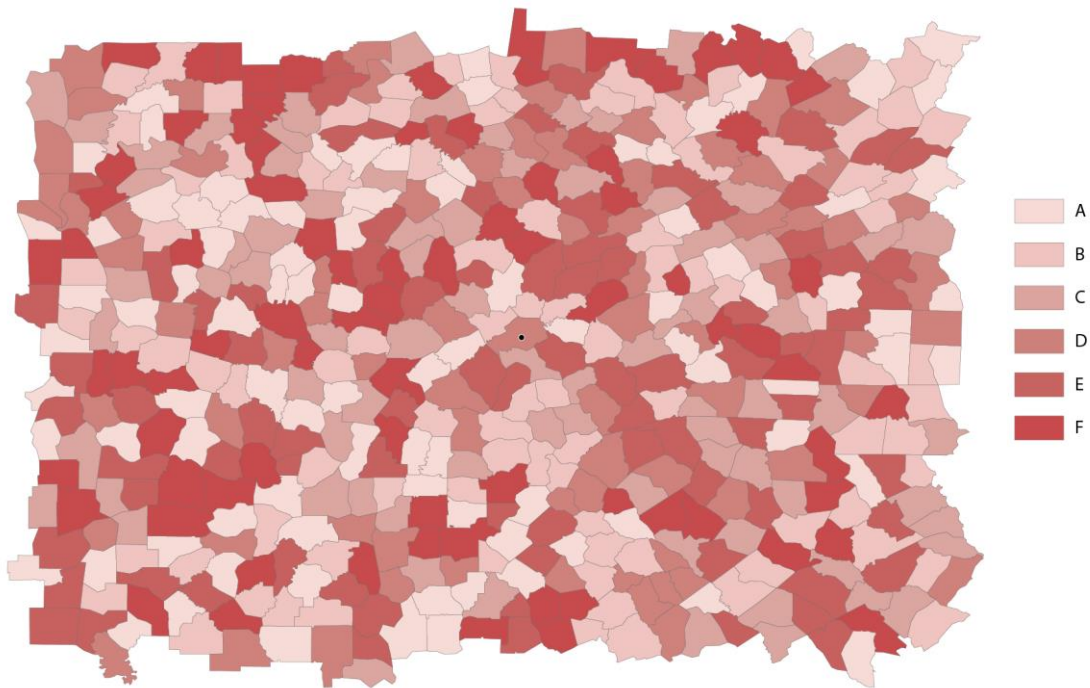
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly
použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 4-8-10-8-4$, pořadí určovaného intervalu B.



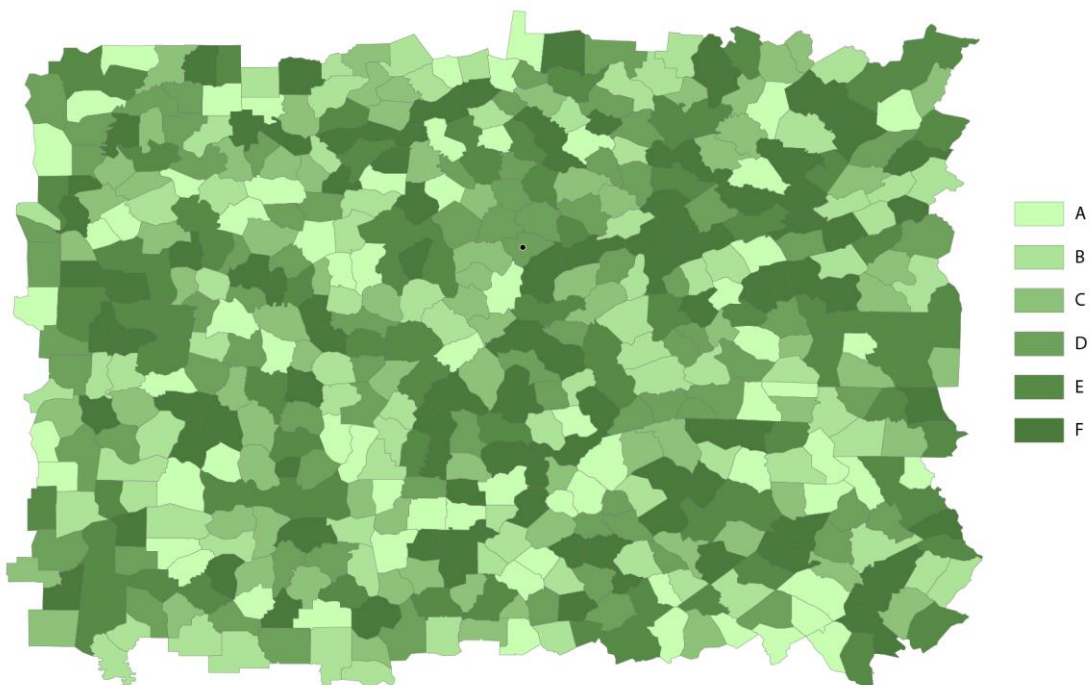
Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly
použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 4-8-10-8-4$, pořadí určovaného intervalu C.



Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly
použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 6-8-10-8-6$, pořadí určovaného intervalu D.



Úkol: Přiřaď k označenému areálu správný interval z legendy.

Testované podmínky: barevná vzdálenost mezi intervaly
použitého kvalitativního schématu $\Delta E_{00} = 6-8-10-8-6$, pořadí určovaného intervalu D.



KATEDRA GEOINFORMATIKY

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

BAREVNÁ VZDÁLENOST V KARTOGRAFII

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: P1314 Geografie

Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie

Školitel: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Mgr. Alžběta Brychtová

COLOR DISTANCE IN CARTOGRAPHY

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 in 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 in Olomouc.

Předkladatel / Submitter:

Mgr. Alžběta Brychtová

Školitel / Supervisor:

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
Katedra geoinformatiky
Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci
17. listopadu 50
771 46 Olomouc

Oponenti / Reviewers:

Doc. RNDR. Jaromír Kaňok, CSc.
Doc. RNDR. Dagmar Kusendová, CSc. (UK Bratislava)
Doc. RNDr. Tomáš Řezník, Ph.D. (MU Brno)

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 in 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.

© Alžběta Brychtová, 2015

ISSN 1805-7500

Obsah

Obsah	3
1. Abstrakt.....	4
2. Cíle práce a postup řešení.....	5
3. Barevná vzdálenost.....	10
4. Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi	11
5. Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti.....	13
6. Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic	19
7. Diskuze.....	20
8. Závěr.....	21
9. Použité zdroje.....	22
Seznam vybraných publikací autora souvisejících s disertační prací / <i>Author's selected publications related to the dissertation</i>	25
Ostatní publikace autora / <i>Another author's publications</i>	27
1. Annotation	29
2. Summary.....	30

1. Abstrakt

Cílem disertační práce je výzkum vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost prostorových informací vizualizovaných v mapách. Kromě vlastního základního výzkumu je v práci popsána teorie, klíčové pojmy a informace o principech vnímání barev člověkem, způsobech specifikace barev a výpočtech barevné vzdálenosti odpovídající lidské percepci.

V první části práce proběhl výzkum přístupu zkušených kartografů k tvorbě map z hlediska výběru a reprodukce barev. Byly hodnoceny nástroje pro správu barev vybraných kartografických programů a zjišťovány hodnoty barevné vzdálenosti, které jsou na mapách běžně používány, i když nezáměrně.

Stěžejní částí disertačního výzkumu bylo empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo kvantita je reprezentovaná barvou. Bylo provedeno šest experimentů s cílem najít optimální hodnoty barevné vzdálenosti mezi popisem a mapovým podkladem a mezi intervaly a kategoriemi sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

Disertační práce vyústila ve vytvoření nástroje pro tvorbu sekvenčních barevných stupnic, který umožňuje nastavení počtu odstínů (intervalů) a jejich vzájemné vizuální vzdálenosti určené prostřednictvím metody výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000. Používání nástroje v souladu se závěry disertačního výzkumu umožní všem tvůrcům map tvořit efektivní mapové výstupy.

Koncepce barevné vzdálenosti, jako metriky popisující kvalitativní i kvantitativní rozdíly mezi znaky na mapě, nebyla v kartografii doposud rozpracována. Proto jsou výsledky disertační práce ojedinělé a mohou být uplatněny v praktické kartografii, i při výzkumu vnímání a práce s mapami jejich uživateli.

Klíčová slova:

Kartografie, eye-tracking, použitelnost, čitelnost, barva, barevná vzdálenost

2. Cíle práce a postup řešení

Hlavním cílem práce je výzkum vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost vizualizované prostorové informace v mapě. v teoretické rovině je výzkum zaměřen na zpřesnění definice barevné vzdálenosti v procesu čtení mapy. V praktické rovině zahrnuje experimentální ověření předpokladů o percepci map v souvislosti s barevnou vzdáleností.

V disertační práci byla barevná vzdálenost začleněna do konceptu vizuální vzdálenosti, byly stanoveny podmínky a metody měření barevné vzdálenosti a prostřednictvím výzkumných metod kognitivní kartografie provedeny experimentální studie vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost mapového obsahu.

Snahou autorky bylo přispět k rozvoji moderní kartografie zodpovězením vybraných výzkumných otázek:

- Co je barevná vzdálenost a jaký je její vztah k vizuální vzdálenosti?
- Jaké jsou metody měření barevné vzdálenosti?
- Jak změna barevné vzdálenosti ovlivňuje čitelnost mapy?
- Existuje kritická efektivní hodnota barevné vzdálenosti pro kartografické vyjadřování?

Cíl disertační práce byl plněn řešením následujících tří dílčích cílů (DC).

V rámci *prvního dílčího cíle* byly kvalitativně zkoumány současné postupy, které jsou v praxi uplatňovány zkušenými kartografy při práci s barvami na mapách, bez ohledu na ustálená pravidla metod kartografické vizualizace. Dále proběhlo hodnocení systému správy barev v programech, které se používají pro tvorbu map, v internetových prohlížečích a eye-tracking programech pro tvorbu experimentů. Byla provedena analýza barevných schémat nástroje ColorBrewer 2.0, z níž byly vyvozeny parametry, které se staly základem pro vlastní experimentální výzkum.

Hlavním východiskem prvního dílčího cíle bylo poskytnout vlastnímu základnímu výzkumu teoreticko-praktický základ formou získání představy o současných aplikovaných postupech v moderním kartografickém designu a technologických možnostech zobrazování digitálních map s důrazem na jejich barevnost.

Celkem byly provedeny tři studie:

1. Experiences: Výzkum současných postupů při tvorbě map
2. ColMan: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map
3. ColDist: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

Druhý dílčí cíl představuje nejdůležitější část disertační práce. V průběhu jeho řešení byly metodami kvantitativního výzkumu současné kognitivní kartografie (dotazníkové šetření a eye-tracking výzkum) ověřovány předpoklady o vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost map. Součástí podcíle bylo provedení a vyhodnocení šesti experimentálních studií uživatelské percepce.

Celkem bylo provedeno následujících šest experimentů:

1. Labels: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti fontu na čitelnost popisu
2. Schemes: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost
3. Euclid: Vliv vzdálenosti znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení
4. Order: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy
5. Optimization: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic
6. Hue: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

Třetím dílčím cílem bylo navrhnout a vytvořit aplikaci umožňující konstrukci barevných stupnic způsobem, který vychází z výsledků a výstupů experimentálního testování. Součástí byl i návrh doporučeného postupu pro práci s barvami na mapách, který zabezpečí konzistentní barevnost výstupů v digitálním i analogovém prostředí.

Plnění cílů disertační práce předcházel rozsáhlý teoretický rozbor zaměřený na postihnutí souvislosti mezi čitelností mapy, vizuální a barevnou vzdáleností. Byla vymezena terminologie problematiky barevných modelů a prostorů, včetně uvedení jejich přehledu a vhodnosti pro výpočet barevné vzdálenosti, která odpovídá percepci lidského jedince s normálním barevným viděním. Na základě studia odborné literatury byla vybrána a specifikována metoda výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000. V poslední řadě byl definován systém správy barev a jeho význam v kartografické vizualizaci.

DC 1

V první fázi byl proveden **kvalitativní výzkum** s cílem zjistit současné postupy, které jsou v praxi uplatňovány zkušenými kartografy při práci s barvami na mapách, bez ohledu na ustálená pravidla metod kartografické vizualizace. Obecně je cílem kvalitativního výzkumu porozumět zkoumanému problému, jednotlivcům, nebo skupinám v jejich přirozeném prostředí (Klener, 1996). Výstupem je zpráva obsahující názory respondentů a komplexní popis a výklad problému včetně vyjádření výzkumníka; výsledky kvalitativního výzkumu mohou signalizovat nutnost hlubšího zkoumání problému (Creswell, 1997). Výsledky kvalitativního výzkumu je velmi problematické zobecňovat na celou populaci.

V disertační práci byl aplikován fenomenologický výzkum, jehož cílem je porozumět podstatě prožité zkušenosti nebo poznatkům, prostřednictvím studia jednotlivců, kteří sdílí prožité zkušenosti nebo poznatky. Při fenomenologickém výzkumu se primárně používá metoda rozhovoru (Creswell, 1997). Protože nebylo možné se setkat se všemi účastníky osobně, vlastní výzkum byl proveden formou dotazníkového šetření s použitím otevřených, výběrových, stupnicových a dichotomických (uzavřených) otázek (klasifikace otázek podle Wilkinsona a Birminghama (2003)).

Dále proběhlo **hodnocení systému správy barev** v programech pro tvorbu map, internetových prohlížečích a programech pro přípravu eye-tracking experimentů.

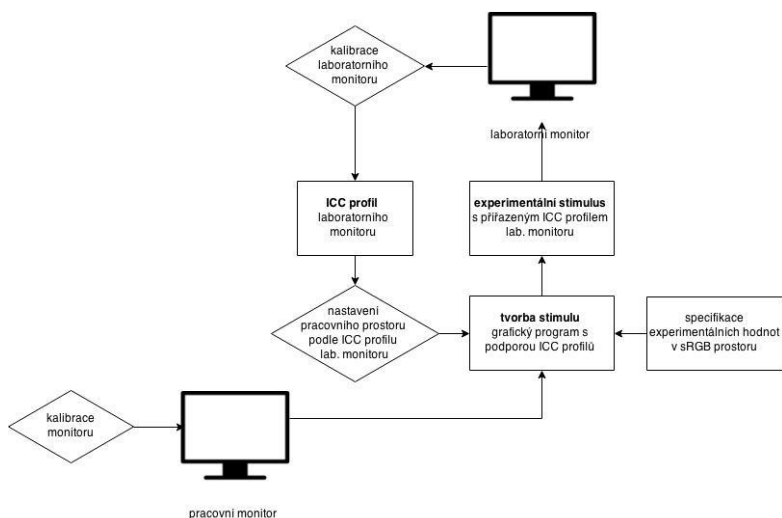
V poslední fázi řešení prvního dílčího cíle proběhla **analýza sekvenčních barevných stupnic** nástroje ColorBrewer 2.0 (Harrower a Brewer, 2003; Brewer, 1999), z níž byly vyvozeny parametry, které se staly základem pro vlastní experimentální výzkum. Souřadnice barev vzorníku ColorBrewer 2.0 byly vztaženy k absolutnímu barevnému prostoru sRGB, a dále byly převedeny do referenčního prostoru CIE 1931 XYZ a CIELAB s použitím referenčního bílého bodu D65. Následně byla sousedícím intervalům stupnic vypočítána barevná vzdálenost metodou CIEDE2000 (Sharma a Dalal, 2005) s nastavením koeficientů $K_i = K_h = K_c = 1,0$.

DC 2

Všechny stimuly použité v experimentech byly statické mapy různých, především fiktivních, území, zjednodušené ve smyslu tematického obsahu a grafického provedení.

Program pro spuštění experimentů (SMI Experiment Center) nepodporuje správu barev a barvy zobrazuje prostřednictvím celého gamutu monitoru. Proto

byly stimuly převedeny z výchozího sRGB profilu do ICC profilu laboratorního monitoru, aby barevná vzdálenost na zobrazených stimulech odpovídala experimentálně stanoveným hodnotám (obr. 1). Při webovém průzkumu nebylo možné barevnost stimulů vůbec kontrolovat. Stimuly měly přiřazený ICC profil sRGB. Vnímaná barevná vzdálenost záležela jak na samotných parametrech uživatelských monitorů, tak na webovém prohlížeči, který účastníci výzkumu pro experiment zvolili. Velké množství zapojených respondentů však zajistilo spolehlivou míru ekologické validity experimentu



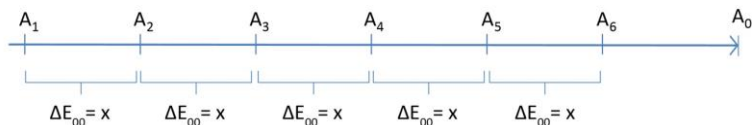
Obrázek 1. Postup přípravy experimentálních stimulů pro eye-tracking testování.

Pro výpočet barevné vzdálenosti ΔE_{00} byla použita metoda CIEDE2000, jejíž proměnné jsou definovány v prostoru CIELAB. Experimentální stimuly byly zobrazovány pouze v digitálním prostředí, a proto byla jejich barevnost omezena gamutem barevného prostoru sRGB.

Metoda konstrukce testovaných barevných schémat byla založena na výpočtech analytické geometrie, konkrétně průniku dvou podprostorů: barevného prostoru CIELAB a křivky, na níž leží hledaná barevná stupnice.

Princip konstrukce sekvenčních barevných stupnice spočíval v nalezení barev ležících na jedné přímce v daných vzdálenostech $\Delta E_{00} = x$ (obr. 2). Přímka je určena dvěma body A_1 a A_0 , kde A_1 se stává krajní hodnotou hledané stupnice a A_0 pomocnou barvou určující směr konstrukce stupnice v barevném prostoru

CIELAB. Kvalitativní stupnice byly konstruovány obdobným způsobem na kružnici k ležící v rovině kolmé k ose L.



Obrázek 2. Princip konstrukce sekvenčních stupnic

V každé studii byli účastníci experimentu požádáni, aby uvedli svůj věk, pohlaví, zda jim byla lékařsky potvrzena porucha barvocitu a stupeň odbornosti v kartografii. Při testování v eye-tracking laboratoři byla dále provedena třináctibodová kalibrace. Na začátek experimentu byla zařazena tzv. trénovací úloha, při níž bylo účastníkům vysvětleno zadání, aby se zamezilo neporozumění otázky v průběhu měření dat. Následovaly sady stimulů vztahující se k experimentální úloze (tzv. trial). Pořadí trialů bylo pro každého účastníka jedinečné. Schematické znázornění průběhu celého experimentu je znázorněno na obrázku 3.



Obrázek 3. Průběh eye-tracking experimentu.

Ve všech provedených experimentech druhého dílčího cíle byly zkoumány dvě výkonnostní metricky - účinnost (správnost, nebo přesnost vyřešené úlohy) a efektivita (rychlost s jakou respondenti úlohu vyřešili). K hlubšímu porozumění výsledků zjištěných tradičními výkonnostními metrikami byla provedena analýza vybraných eye-tracking metrik (frekvence fixací, průměrná délka fixací a rychlost scanpath) a analýza přesunů mezi definovanými oblastmi zájmu (AOI).

Pro dotazníkové šetření byl využit open source nástroj Lime Survey ve verzi 1.9 (The LimeSurvey project, 2011). Ten umožňuje měřit čas potřebný k vyřešení

otázky s přesností na milisekundy, nastavit náhodné pořadí zobrazování stimulů pro každého účastníka a další parametry, které jsou běžně aplikovány při studiích použitelnosti.

Eye-tracking experimenty proběhly v kontrolovaných laboratorních podmínkách v laboratoři Katedry geoinformatiky PřF UPOL, která je vybavena bezkontaktním nízkofrekvenčním eye-trackerem SMI RED 250 se vzorkovací frekvencí 120 Hz.

Pro ověření stanovaných hypotéz byly provedeny následující statistické testy: Shapiro-Wilkův test normality, Pearsonův Chí-kvadrát test dobré shody, Mann-Whitneyův test, Kruskal-Wallisův test a post-hoc Kruskal-Wallisův test.

DC 3

Analýzou výsledků z druhého dílčího cíle byly získány poznatky o optimálním nastavení hodnot barevné vzdálenosti v rámci barevné škály. Tyto závěry byly okomentovány a prezentovány jako sada doporučení pro kartografickou vizualizaci. Zároveň byl vytvořen nástroj, který na základě parametrů zadaných uživatelem (počáteční a koncová barva škály, počet kategorií a barevná vzdálenost) dokáže specifikovat ostatní stupně barevné škály.

Uživatelské rozhraní vytvořeného nástroje Sequential Color Scheme Generator 1.0 bylo vytvořeno s využitím HTML, CSS, PHP a JavaScript. Pro výběr barev byl implementován dialog vytvořený Dyerem (2007), který umožňuje specifikaci barev v souřadnicích HSB, RGB a HEX, nebo výběrem z palety. Nástroj je dostupný z adresy <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

3. Barevná vzdálenost

Lidskou schopnost posoudit rozdíl mezi barvami je možné kvantifikovat metrikou *barevná vzdálenost*, kterou zavedla Mezinárodní komise pro osvětlení (z franc. *Commission internationale de l'éclairage, CIE*). Současně s postupným vývojem barevných modelů se zdokonalovaly i výpočty barevné vzdálenosti, pro niž se vžil označení ΔE vycházející z německého pojmu *Empfindung*, který se do češtiny překládá jako *počitek* (Robertson, 1990).

Podle Wermana (2012) jsou pro výpočet barevné vzdálenosti nejvíce využívány metody CIE76 (ΔE_{ab}) a CIEDE2000 (ΔE_{00}). Přestože je metoda CIE76 v současnosti považována za ne zcela dokonalou metodu výpočtu barevné vzdálenosti (především v oblasti vysoce saturovaných barev), je díky své jednoduchosti stále hojně využívána (Szafir et al., 2014).

Přesnější, avšak mnohem složitější výpočet barevné vzdálenosti, umožňuje metoda CIEDE2000 (Sharma et al., 2005). V porovnání s jinými metodami výpočtu barevné vzdálenosti, CIEDE2000 může být aplikována na výpočet jak velmi malých ($\Delta E_{00} < 1$), tak i velkých ($\Delta E_{00} > 10$) barevných vzdáleností (Carter a Huertas, 2009). Z tohoto důvodu byla metoda CIEDE2000 aplikována ve všech výpočtech disertačního výzkumu.

Nejmenší rozdíl mezi dvěma podněty (zrakovými, sluchovými, chuťovými, čichovými či hmatovými) různé intenzity, který vede ke vzniku dvou počítků či vjemů se označuje jako relativní nebo rozdílový počítkový práh (v angl. Just Noticeable Difference, JND). JND se definuje jako změna velikosti podnětu, kterou je subjekt schopen zaregistrovat v 50 % pokusů (Hunt, 2009). Pro barvy není JND ustáleno; různí autoři uvádějí různé hodnoty. Například Yang et al. (2012) uvádí $\Delta E_{00} = 0,5$, Linhares et al. (2008) $\Delta E_{00} = 0,6$, Mahy et al. (1994) $\Delta E_{ab} = 2,3$.

Při kartografické vizualizaci jsou hodnoty barevné vzdálenosti blízké JND pro odlišení znaků pravděpodobně nevhodné, především pokud jsou obklopeny dalšími grafickými prvky. Nedostatečná barevná vzdálenost znaků zhoršuje celkovou čitelnost mapy a tedy schopnost uživatelů získat informace (Chesneau, 2007; Steinrücken a Plümer, 2013; Stigmar, 2010). Na druhou stranu je v některých případech vhodné aplikovat světlejší odstíny barev s navzájem nižší barevnou vzdáleností (především při konstrukci barevných stupnic), aby bylo možné do mapy umístit další prvky (např. popis, bodové a liniové znaky, diagramové znaky), které by na tmavém podkladu mohly zaniknout (Brychtová a Çöltekin, 2014).

4. Studium barevné vzdálenosti v kartografické praxi

Pravidla o optimální hodnotě barevné vzdálenosti doposud neexistují, a proto kartografové při tvorbě map využívají existující nebo vlastní vzorníky, které jsou ověřené spíše letitou praxí než výzkumem. Kvůli absenci exaktně podložených pravidel o barevné vzdálenosti na mapách je první dílčí cíl disertační práce zaměřen na výzkum přístupu zkušených kartografů k tvorbě map z hlediska výběru a reprodukce barev a na zjištění hodnot barevné vzdálenosti, které na mapách používají (i když nezáměrně). Součástí dílčího cíle je i hodnocení nástrojů pro správu barev vybraných kartografických programů.

Experiences: Výzkum současných postupů při tvorbě map

Cílem kvalitativní studie *Experiences* bylo zjistit současný stav problematiky používání a reprodukce barev v kartografii bez ohledu na jejich teoretickou

opodstatněnost a způsob zapracování poznatků experimentální kognitivní kartografie v běžné praxi. Výzkumu se zúčastnilo osm kartografů, kteří souhlasili s uvedením jejich jména a organizace, pro niž pracují: René Sieber (Atlas of Switzerland, ETH Zurich), Christopher Wesson (Ordnance Survey, Southampton), Jan Ptáček (Kartografie Praha), Josef Rančák (Geodézie OnLine), Bohumil Ptáček (kartograf živnostník, Olomouc), Jaroslav Burian (kartograf živnostník, Olomouc), Jan Rykr (kartograf živnostník, Samoa) a Alena Vondráková (Univerzita Palackého v Olomouci).

Podstatným zjištěním provedené studie je, že jen malá část profesionálních kartografů má dostatečné znalosti o systému správy barev, z čehož vyplývá, že nevyužívají výhody, které systém správy barev může přinést. Výslednou barevnost svých map kartografové kontrolují vlastními nesystémovými postupy, které fungují. Je ale pravděpodobné, že s uplatněním systému správy barev by jejich postupy mohly být robustnější.

V disertační práci je kladen důraz na testování barevných schémat. V souvislosti s jejich tvorbou je velice často diskutován problém optimálního počtu rozeznatelných odstínů. Z výsledků dotazníku je patrné, že se praxe často liší od teoretických pouček, a kartografové si dovolí na mapách použít i více než 15 odstínů. Většina z nich navíc uvedla, že publikovali minimálně jednu mapu s plynulou stupnicí (bez kategorií).

Závažným, avšak předpokládaným, zjištěním je, že tvůrci map nevyužívají při své práci výsledky moderního výzkumu vzhledu map. Teoretická a praktická kartografie představuje v současnosti dva oddělené světy. V zájmu obou by bylo vhodné tyto dva světy propojit: kartografický výzkum by se měl zaměřit na problémy podníčené praktickými kartografy a své výsledky publikovat takovou formou, aby byly dostupné i mimo akademickou sféru.

ColMan: Hodnocení systému správy barev v programech pro tvorbu map

V rámci studie proběhlo hodnocení programů určených pro tvorbu a publikaci map. Ani jeden z otestovaných GIS a kartografických programů správu barev nepodporuje. Proto autorka doporučuje tyto programy využívat pro správu a analýzu dat, ale pro finální úpravy a export do požadovaného formátu použít jiný program umožňující kontrolu barev (například některý z grafických programů z Adobe Creative Suite).

Vzhled on-line map je ovlivněn internetovým prohlížečem. Internet Explorer 11 a Safari 5.1.7 podporují obě verze ICC profilů. Pokud má uživatel kalibrovaný monitor a prohlíží mapové soubory s definovaným ICC profilem, je zaručeno, že je bude vidět se stejnými barvami, které autor mapy zamýšlel.

ColDist: Hodnocení barevné vzdálenosti ColorBrewer 2.0

Protože kartografický výzkum nebyl doposud zaměřen na empirické stanovení minimální efektivní hodnoty barevné vzdálenosti pro odlišení kartografických znaků, v rámci studie ColDist byly zjišťovány hodnoty barevné vzdálenosti, které jsou v současné kartografii běžně používány, i když nezáměrně. Bylo provedeno hodnocení 18 barevných variant sekvenčních stupnic vzorníku ColorBrewer 2.0 o 9, 6 a 3 intervalech. Sousedícím intervalům jednotlivých stupnic byla vypočítána jejich barevná vzdálenost metodou CIEDE2000. Bylo zjištěno, že barevná vzdálenost mezi intervaly není v rámci jednotlivých stupnic konstantní. Mediánová barevná vzdálenost ΔE_{00} stupnic s 9 intervaly je $Mdn=10,28$ (min=3,04; max=20,46), se 6 intervaly je $Mdn=12,41$ (min=6,24; max=26,44; obr. 23), zatímco se 3 intervaly je téměř dvojnásobná $Mdn=20,61$ (min=11,26; max=33,92). Tato měření se stala základem pro stanovení testovaných hodnot pro vlastní experimenty.

5. Experimentální testování vlivu barevné vzdálenosti

Druhý dílčí cíl disertační práce byl zaměřen na empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo kvantita je reprezentovaná barvou.

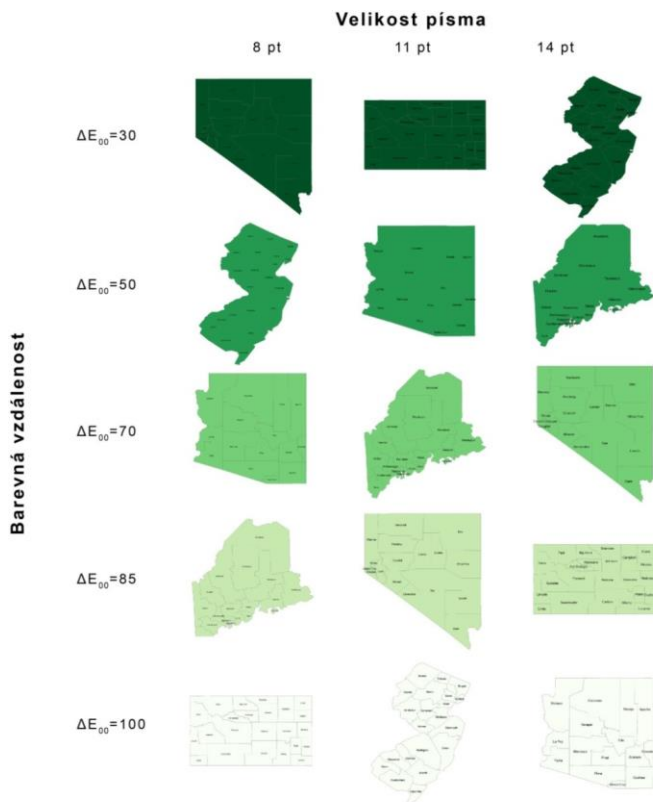
Výzkum byl proveden formou eye-tracking testování a dotazníkového šetření. Bylo provedeno celkem 6 experimentů, které byly zaměřeny na hodnocení barevnosti popisu, sekvenčních a kvalitativních barevných schémat s uniformním a neuniformním (konkávním) rozložením hodnot barevné vzdálenosti mezi jejich intervaly, resp. kategoriemi:

V průběhu testování byla zjišťována správnost odpovědí, čas do odpovědi a vybrané eye-tracking metriky (průměrná délka fixací, frekvence fixací, rychlost scanpath a přesuny mezi AOI). Nejdůležitější závěry vyplynuly z analýzy výkonnostních metrik (tedy správnosti a času do odpovědi); eye-tracking metriky většinou tyto závěry potvrdily, ale nepřinesly více vysvětlení o studované problematice. Bylo učiněno několik důležitých poznatků o vnímání barevné vzdálenosti na mapách, které jsou shrnuty pro každý z provedených experimentů.

Labels: Vliv barevné vzdálenosti a velikosti písma na čitelnost popisu v mapách

Cílem experimentu bylo zjistit vliv barevné vzdálenosti mezi popisem na mapě a podkladem, velikosti písma a kombinace obou proměnných na schopnost uživatelů vyhledat na mapě administrativních jednotek vybraných států USA určený popis. Bylo testováno 5 úrovní barevné vzdálenosti mezi popisem a podkladem $\Delta E_{00} = 30, 50, 70, 85$ a 100 a 3 úrovně velikosti písma 8, 11 a 14 pt (obr. 4).

Všechny testované hodnoty barevné vzdálenosti mezi písmem a popisem byly pro vyhledání názvu administrativní jednotky na mapě vyhovující. Správnost odpovědí, která patří mezi klíčové ukazatele použitelnosti, byla 100%. Čas strávený řešením úlohy však ukázal, že čím je barevná vzdálenost mezi popisem a podkladem nižší, tím déle trvá jeho identifikace.

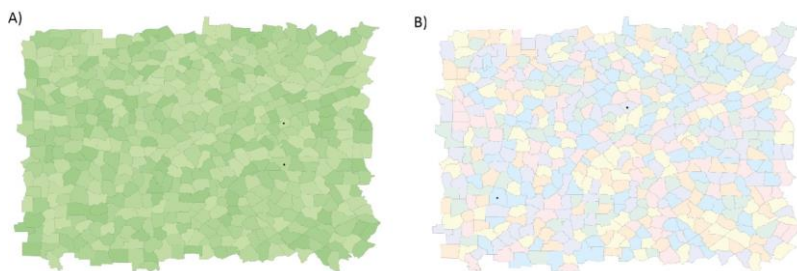


Obrázek 4. Experimentální stimuly studie Labels.

Schemes: Vliv barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních a kategoriemi kvalitativních schémat na jejich rozlišitelnost

V experimentu *Schemes* byl systematicky analyzován vliv barevné vzdálenosti na použitelnost sekvenčních a kvalitativních barevných schémat. Bylo hodnoceno 5 sekvenčních a 5 kvalitativních barevných schémat o šesti intervalech resp. kategoriích odlišených jednotnou barevnou vzdáleností $\Delta E_{00} = 2, 4, 6, 8$ a 10 . Účastníci měli za úkol porovnat barevnost dvou nebo tří areálů označené tečkou a posoudit barevnost jejich výplně (ukázka stimulů je na obr. 5).

Analýza dat jasně ukázala, že nejnižší testovaná hodnota barevné vzdálenosti $\Delta E_{00} = 2$ mezi dvěma intervaly/kategoriemi sekvenčních/kvalitativních barevných schémat vedla k největšímu počtu chyb a výraznému zpomalení odpovědi při odlišování kvality/kvantity areálů na mapě. S rostoucí barevnou vzdáleností konstantně rostla správnost i rychlost odpovědi. Stanovení optimální hodnoty barevné vzdálenosti vyžaduje určení prahové hodnoty, která nesmí být danou překročena. Tu však nelze určit zcela objektivně. Zadaný úkol, který respondenti řešili, byl extrémně jednoduchý a nevyžadoval žádné speciální znalosti, proto by správnost měla být téměř sto procentní. Tak vysoká správnost nebyla zaznamenána u žádné ze sledovaných hodnot ΔE_{00} . Při stanovení akceptovatelné míry správnosti 95 % by na základě měření z webového průzkumu i eye-tracking testování podmínky bezpečně splnila pouze $\Delta E_{00} = 10$.



Obrázek 5. Vybrané stimuly experimentu *Schemes*: (A) srovnání dvou areálů, sekvenční stupnice s $\Delta E_{00} = 4$; (B) srovnání dvou areálů, kvalitativní stupnice s $\Delta E_{00} = 8$.

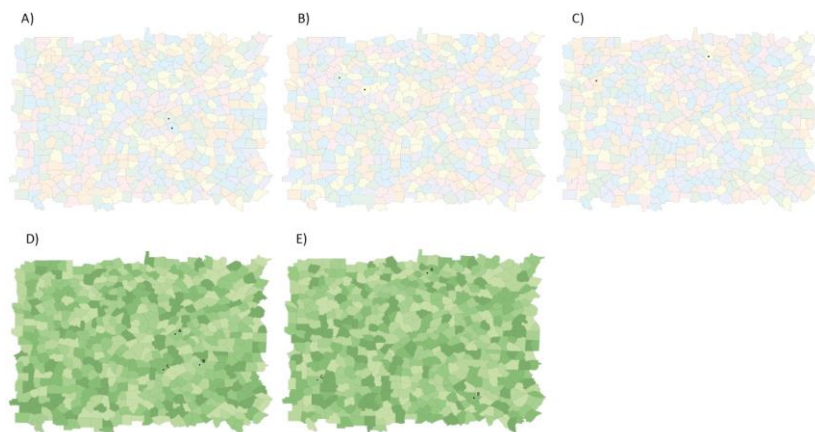
Euclid: Vliv vzdálenost znaků v mapě na rozlišitelnost jejich barevného provedení

Experiment byl zaměřen na hodnocení vlivu barevné vzdálenosti v souvislosti s prostorovou vzdáleností areálových znaků na mapě a zjistit, jaký je vliv prostorové vzdálenosti na rozlišitelnost kategorií sekvenčních a kvalitativních barevných schémat. Byly testovány tři úrovně vzdálenosti areálů na mapě (obr. 6).

Experimentem bylo zjištěno, že schopnost respondentů správně porovnat kvalitu i kvantitu dvou areálů konzistentně klesá s jejich vzájemnou (prostorovou) vzdáleností na mapovém listu.

Zkoumáním vzájemného působení barevné i prostorové vzdálenosti bylo zjištěno, že pro sekvenční stupnice je vhodné používat pouze nejvyšší testovanou hodnotu barevné vzdálenosti $\Delta E_{00}=10$, při které správnost odpovědí není ovlivněna vzájemnou prostorovou vzdáleností dvou areálů. Ze stejných důvodů je pro odlišení kategorií kvalitativních stupnic doporučeno používat barevnou vzdálenost $\Delta E_{00}=8$ a $\Delta E_{00}=10$.

Experimenty *Schemes* a *Euclid* ukázaly, že rozlišení dvou areálů sekvenčních stupnic je obtížnější než areálů kvalitativních stupnic, i když je barevná vzdálenost stejná.



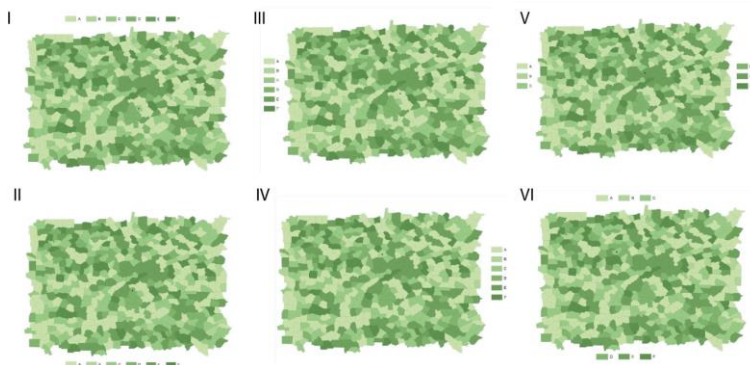
Obrázek 6. Vybrané experimentální stimuly pro úlohu na porovnání dvou areálů označených tečkou s $\Delta d = 1$ (A), $\Delta d = 2$ (B), $\Delta d = 3$ (C) a na porovnání tří areálů $\Delta d = 2$ (D) a $\Delta d = 3$ (E).

Order: Vliv umístění legendy a pořadí intervalů sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

Experiment byl zaměřen na výzkum vlivu *barevné vzdálenosti* mezi intervaly sekvenčních barevných stupnic na schopnost uživatelů přiřadit vybranému areálu na mapě správný interval legendy. Oproti předchozím studiím *Schemes* a *Euclid*, v nichž byla porovnávána barevnost dvou nebo tří areálů v mapě, bylo v této studii úkolem přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě (obr. 7).

Bylo zjištěno, že schopnost uživatelů zjistit správnou odpověď na téže mapě je značně ovlivněno typem úlohy: srovnání barevnosti dvou areálů (v experimentech *Schemes* a *Euclid*) je mnohem jednodušší než určenému areálu najít odpovídající interval v legendě (v experimentu *Order*).

Dalším významným zjištěním bylo, že na správnost odpovědí mělo významný vliv pořadí intervalů v barevné stupnici. Nejsvětlejší (A) a nejtmaší (F) intervaly bylo snazší spojit s odpovídající položkou v legendě, zatímco prostřední intervaly činily více obtíž. Na základě tohoto výsledku bylo zjištěno, že uniformní rozložení barevné vzdálenosti mezi intervaly nebylo optimální.

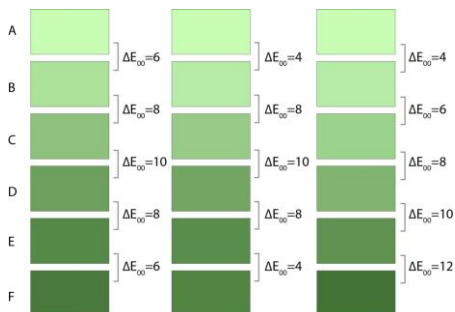


Obrázek 7. Ukázka stimulů s různým umístěním legendy: (I) nahoře, (II) dole, (III) vlevo, (IV) vpravo, (V) vertikálně rozdělená, (VI) horizontálně rozdělená.

Optimization: Optimalizace barevné vzdálenosti mezi intervaly sekvenčních stupnic

Na základě předchozích výsledků byly v experimentu *Optimization* hodnoceny optimalizované sekvenční stupnice, pro jejichž intervaly bylo oproti předchozím experimentům využito konkávní rozložení barevných vzdáleností. Prostřední intervaly stupnic byly více vizuálně odlišeny, než krajní intervaly. Byly testovány

tři stupnice s rozložením ΔE_{00} 4-8-10-8-4, 6-8-10-8-6 a 4-6-8-10-12 (obr. 8). Úkolem pro respondenty bylo přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě. V porovnání se stupnicemi s uniformním rozložením barevné vzdálenosti mezi intervaly všechny optimalizované stupnice způsobily značné zvýšení správnosti odpovědí i času do jejich nalezení. Nejlepším řešením se ukázala stupnice ΔE_{00} 4-8-10-8-4.

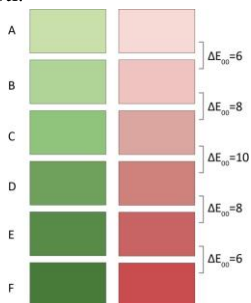


Obrázek 8. Náhled barevnosti optimalizovaných sekvenčních stupnic.

Hue: Vliv barevného tónu sekvenčních stupnic na čitelnost mapy

V posledním experimentu byl hodnocen vliv tónu sekvenčních stupnic se shodným nastavením barevné vzdálenosti mezi jejich intervaly ověřit, na schopnost respondentů přiřadit označenému areálu v mapě správný interval v legendě. Byly testovány dvě sekvenční stupnice (zelená a červená) s konkávním rozložením barevných vzdáleností mezi intervaly ΔE_{00} 6-8-10-8-6 (obr.9).

Experiment potvrdil, že i přes proměnlivou citlivost lidského oka na různé části viditelného spektra, tón sekvenčních stupnic neovlivní schopnost uživatelů mapy nalézt správnou odpověď, pokud jsou ve stupnicích zachovány stejné hodnoty barevné vzdálenosti.

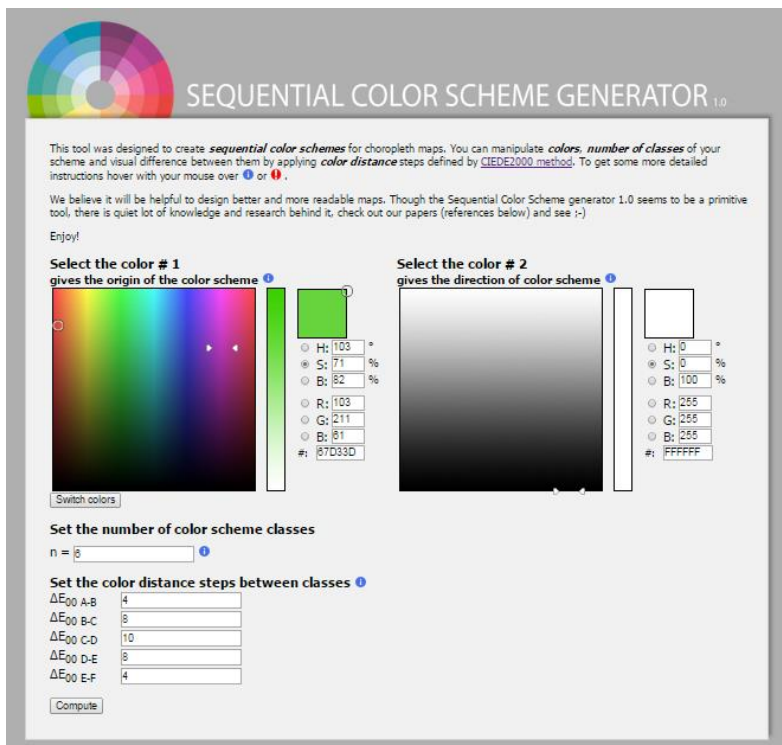


Obrázek 9. Náhled barevnosti testovaných sekvenčních stupnic.

6. Tvorba nástroje pro konstrukci barevných stupnic

Poslední dílčí cíl představuje praktické vyvrcholení celého disertačního výzkumu. Na základě poznatků o vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost map byl navrhnout a vytvořen nástroj pro konstrukci sekvenčních barevných schémat *Sequential Color Scheme Generator 1.0*, který umožňuje uživatelské nastavení barevnosti schématu, počet odstínů (intervalů) stupnice a barevné vzdálenosti ΔE_{00} mezi nimi. Ve výchozím nastavení nástroje jsou přednastaveny parametry sekvenční stupnice, které byly v rámci disertační práce vyhodnoceny jako nejlepší (6 intervalů stupnice s barevnými vzdálenostmi ΔE_{00} 4-8-10-8-4). Nástroj je volně dostupný na webových stránkách <http://eyetracking.upol.cz/color/> (obr. 10).

V poslední části bylo uvedeno doporučení pro přípravu map pro internet a tisk s ohledem na správnou manipulaci s barvami.



Obrázek 10. Uživatelské rozhraní nástroje Sequential Color Scheme Generator 1.0.

7. Diskuze

V průběhu řešení disertační práce se vyskytly problémy, které mohly být řešeny různými metodami a postupy. Rozhodnutí pro použití konkrétního řešení, které autorka považuje za kontextu řešené problematiky za nejvíce zásadní, jsou uvedena v této kapitole včetně jejich zdůvodnění.

Počet respondentů studií a experimentů

Čím více respondentů se účastní experimentu, tím jsou jeho výsledky statisticky silnější. Holmqvist a kol. (2011) uvádějí, že pro každou testovanou podmínku by mělo být monitorováno alespoň 10 respondentů. To by například u experimentu Labels znamenalo oslovit 150 respondentů (5 hodnot barevné vzdálenosti \times 3 velikosti písma = 15 testovaných podmínek). Vzhledem k organizační náročnosti eye-tracking experimentů je nemožné otestovat tak velkou populaci a na základě existujících studií je patrné, že to není zcela nezbytné. Podle eye-tracking metodologie, kterou vypracovali Pernice a Nielsen (2009) je pro kvantitativní testování dostačující získat data od 20 respondentů. Autorka se tedy domnívá, že množství otestovaných respondentů v experimentech disertačního výzkumu, které neklesá pod počet 35, je dostačující.

Efekt učení

Z důvodu zamezení (nebo rozptýlení) tzv. efektu učení bylo pořadí stimulů v experimentech pro každého účastníka jedinečné. Efekt učení je považován za běžný, avšak nežádoucí zdroj zkreslení experimentálních výsledků, při kterém dochází k naučení se reagovat na experimentální otázky a potenciálně odpovídat správněji ke konci experimentu.

Kontrola vlivu nežádoucích nezávislých proměnných

Patrně největším problémem všech experimentálních studií je zamezit vlivu nežádoucích nezávislých proměnných, ale zároveň zachovat ekologickou validitu experimentu, která vyjadřuje možnost přenesení závěrů z experimentu i na jevy v reálných podmínkách (Sternberg, 2002).

Za nežádoucí nezávislé proměnné lze považovat všechny parametry stimulu, které ovlivní vnímání studované problematiky způsobem, který nelze popsat a tím pádem ani vyloučit. V případě studia barevné vzdálenosti na mapách může mezi nežádoucí proměnné patřit například proměnlivá velikost a tvar areálů na mapě, prostorové uspořádání barevných areálů, parametry hranic areálů, parametry popisu na mapě (včetně jeho uspořádání a délky slov popisu) a další prvky, které jsou na mapách běžně používány.

Stimuly použité v experimentech *Schemes*, *Euclid*, *Order*, *Optimization* a *Hue* byly statické mapy fiktivního území bez popisu, zjednodušené ve smyslu tematického obsahu a grafického provedení. Velikost a tvar zobrazených areálů byly přibližně stejné. Parametry hranic areálů byly na všech stimulech stejné.

Klíčovým problémem bylo vyřešit prostorové uspořádání barevnosti, tak aby areály určené k porovnání nebyly ovlivněny efektem simultánního kontrastu. Na základě důkladné rozvahy bylo rozhodnuto, že uspořádání barev na stimulu, včetně umístění areálů určených k porovnání, bude zcela náhodné, aby byla ekologická validita experimentu maximálně zachována. Bylo předpokládáno, že případný vliv simultánního kontrastu bude díky velkému množství testovaných stimulů rozptýlen.

V případě experimentu *Labels* nebyla kontrola vlivu nežádoucích nezávislých proměnných zcela důsledná. V tomto experimentu byly za stimuly zvoleny mapy konkrétních států s jejich administrativními jednotkami, jejichž počet, tvar, velikost i prostorové rozmístění nebylo v průběhu experimentu jednotné, a mohlo tedy negativně ovlivnit výsledky.

8. Závěr

Hlavním cílem práce bylo vyzkoumat vliv barevné vzdálenosti na čitelnost vizualizované prostorové informace v mapě. Pro dosažení cíle bylo nejprve nutné nastudovat problematiku vnímání barev člověkem, zjistit postupy a prostředky pro popis barev a vybrat nejvhodnější metodu výpočtu barevné vzdálenosti.

V disertační práci byla barevná vzdálenost začleněna do konceptu vizuální vzdálenosti, byly stanoveny podmínky a metody měření barevné vzdálenosti a prostřednictvím výzkumných metod kognitivní kartografie provedeny experimentální studie vlivu barevné vzdálenosti na čitelnost mapového obsahu.

V první části práce proběhl výzkum přístupu zkušených kartografů k tvorbě map z hlediska výběru a reprodukce barev. Byly hodnoceny nástroje pro správu barev vybraných kartografických programů a zjišťovány hodnoty barevné vzdálenosti, které jsou na mapách běžně používány, i když nezáměrně.

Hlavním východiskem prvního dílčího cíle bylo poskytnout vlastnímu základnímu výzkumu teoreticko-praktický základ formou získání představy o současných aplikovaných postupech v moderním kartografickém designu a technologických možnostech zobrazování digitálních map s důrazem na jejich barevnost.

Stěžejní částí disertačního výzkumu bylo empirické ověření vlivu barevné vzdálenosti na schopnost uživatelů map najít, rozlišit a interpretovat prostorovou informaci, jejíž kvalita nebo kvantita je reprezentovaná barvou. Bylo provedeno šest experimentů s cílem najít optimální hodnoty barevné vzdálenosti mezi popisem a mapovým podkladem a mezi intervaly a kategoriemi sekvenčních a kvalitativních barevných schémat.

Disertační práce vyústila ve vytvoření nástroje pro tvorbu sekvenčních barevných stupnic, který umožňuje nastavení počtu odstínů (intervalů) a jejich vzájemné vizuální vzdálenosti určené prostřednictvím metody výpočtu barevné vzdálenosti CIEDE2000. Používání nástroje v souladu se závěry disertačního výzkumu umožní všem tvůrcům map tvořit efektivní mapové výstupy.

Problematika barevné vzdálenosti a jejího vlivu na proces čtení map nebyla v domácí, ani světové literatuře doposud popsána. Z tohoto důvodu je teoretická i praktická část disertační práce ojedinělá. Výsledky provedeného experimentálního výzkumu i vytvořený nástroj pro konstrukci sekvenčních stupnic rozšířily oblast kartografického výzkumu se zaměřením na hodnocení použitelnosti map, pomohou objasnit způsob vnímání barev na mapách a zároveň je lze přímo aplikovat v praktickém procesu tvorby map.

Výsledky disertační práce byly a budou zveřejněny ve vědeckých publikacích, časopisech pro odbornou veřejnost i prostřednictvím sociálních sítí.

9. Použité zdroje

- Brewer, C.A. (1999), "Brewer - Color Use Guidelines for Data Representation", Annual Meeting of the American Statistical Association, Proceedings of the Section on Statistical Graphic, Maryland, Baltimore, pp. 55–60.
- Brychtová, A. and Çöltekin, 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*.
- Carter, R. and Huertas, R. (2009), "Ultra-large color difference and small subtense", *Color Research & Application*, Vol. 35 No. 1, pp. 4–17.
- Creswell, J.W. (1997), *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches*, Sage Publications, London, p. 424.
- Dyer, J. (2007), "PhotoShop-like JavaScript Color Picker", John Dyer's Code, available at: <http://johndyer.name/photoshop-like-javascript-color-picker/> (accessed 10 November 2014).

- Harrower, M. and Brewer, C.A. (2003), "ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Colour Schemes for Maps", *The Cartographic Journal*, Vol. 40 No. 1, pp. 27–37.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. and Van de Weijer, J. (2011), *Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures*, Oxford University Press, 1.ed., p. 560.
- Hunt, M. (2009), *The Story of Psychology*, Knopf Doubleday Publishing Group, p. 896.
- Chesneau, E. (2007), "Improvement of Colour Contrasts in Maps: Application to Risk Maps", *Proceedings of 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007*, pp. 1–14.
- Klener, P. (Ed.). (1996), "Kvalitativní výzkum", *Velký sociologický slovník*, Praha: Karolinum, 1. vyd., p. 1627.
- Linhares, J.M.M., Pinto, P.D. and Nascimento, S.M.C. (2008), "The number of discernible colors in natural scenes.", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 25 No. 12, pp. 2918–24.
- Mahy, M., Van Eycken, L. and Oosterlinck, A. (1994), "Evaluation of Uniform Color Spaces Developed after the Adoption of CIELAB and CIELUV", *Color Research and Application*, Vol. 19 No. 2, pp. 105–121.
- Pernice, K. and Nielsen, J. (2009), *Eyetracking Methodology: How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking*, NN Group, Fremont, USA, p. 163.
- Sharma, G., Wu, W. and Dalal, E.N. (2005), "The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations", *Color Research & Application*, Vol. 30 No. 1, pp. 21–30.
- Steinrücken, J. and Plümer, L. (2013), "Identification of Optimal Colours for Maps from the Web", *The Cartographic Journal*, Vol. 50 No. 1, pp. 19–32.
- Sternberg, R. (2002), *Kognitivní psychologie*, Portál, Praha, 1. vyd., p. 636.
- Stigmar, H. (2010), *Making 21st Century Maps Legible - Methods for Measuring and Improving the Legibility and Usability of Real-Time Maps*, Lund University
- The LimeSurvey project. (2011, April 24), "LimeSurvey - the free and open source survey software tool", Carsten Schmitz, available at: <https://www.limesurvey.org/> (accessed 12 June 2013).
- Wilkinson, D. and Birmingham, P. (2003), *Using Research Instruments: A Guide for Researchers*, RoutledgeFalmer, p. 190.
- Yang, Y., Ming, J. and Yu, N. (2012), "Color Image Quality Assessment Based on CIEDE2000", *Advances in Multimedia*, Vol. 2012, pp. 1–6.

Odborný životopis autora / *Curriculum vitae*
OSOBNÍ ÚDAJE / PERSONAL INFORMATION

Jméno / <i>Name</i>	Alžběta Brychtová
Bydliště / <i>Adress</i>	Boční 233, Mariánské údolí
E-mail	alzbeta.brychtova@gmail.com
Narozen / <i>Birth</i>	26. 6. 1986, Hodonín



VZDĚLÁNÍ / EDUCATION

2010–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, doktorské studium, obor Geoinformatika a kartografie / PhD study Geoinformatics and Cartography
2008–2010	Univerzita Palackého v Olomouci, navazující Mgr. studium, obor Geoinformatika / Master's degree: specialization Geoinformatics
2008–2010	Univerzita Palackého v Olomouci, souběžné studium, obor Učitelství geografie / specialization Geography Teaching
2005–2008	Univerzita Palackého v Olomouci, Bc. studium, obor Geografie-Geoinformatika / Bachelor's degree: Geography–Geoinformatics

PRAXE / EXPERIENCE

2015–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt 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>
2012–2014	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt OP VK NeoCartoLink (koordinátor / coordinator) - <i>Podpora tvorby národní sítě kartografie nové generace / Supporting the creation of a national network of new generation on Cartography</i>
2010–2012	Univerzita Palackého v Olomouci, projekt ESF (GIS specialista, kartograf / GIS specialist, map maker) <i>Inovace činnosti SPC při posuzování speciálních vzdělávacích potřeb žáků a dětí se zdravotním postižením, mapování dostupnosti a působnosti služeb SPC</i>

VÝUKOVÉ AKTIVITY / TEACHING

2010–2014	cvičení na Katedře geoinformatiky UP: Tematická kartografie, Počítačová kartografie, Dějiny kartografie, Kartometrie <i>seminars of: Thematic Cartography, Digital Cartography, History of Cartography, Cartometry</i>
-----------	---

2014	St Andrews University, Great Britain
2014	University of Zurich, Switzerland
2013	University of Zurich, Switzerland
2012	University of Zurich, Switzerland
2011	ETH Zurich, Switzerland

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)

- **Brychtová, A.** and Çöltekin, 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*, 11 s. doi:10.1179/1743277414Y.0000000103 (*článek nemá zatím přiřazené číslo vydání a zatím není indexován na WoS*).
- Popelka, S. and **Brychtová, A.** (2013). Eye-tracking Study on Different Perception of 2D and 3D Terrain Visualisation. *The Cartographic Journal*, 50(3), s. 240–246. doi:10.1179/1743277413Y.0000000058

Publikace v recenzovaném časopise ve světově uznávané databázi (Scopus) (Jneimp)

Publications in a scientific journal indexed on other world database (Scopus) (Jneimp)

- Deeb, R., Ooms, K., **Brychtová, A.**, Van Eetvelde, V., and De Maeyer, P. (2014). Background and foreground interaction: Influence of complementary colors on the search task. *Color Research & Application*, 9 s. doi:10.1002/col.21920, (*článek nemá zatím přiřazené číslo vydání*).
- Popelka, S., **Brychtová, A.**, and Voženílek, V. (2012). Eye-Tracking a jeho využití při hodnocení map. *Geografický časopis SAV*, 64(1), s. 71–87.

Kapitola v odborné knize (C) / Chapter in a scientific book (C)

- **Brychtová, A.** (2015). Exploring the influence of colour distance and legend position on choropleth maps readability. *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014*, s. 315–326.
- Popelka, S., **Brychtová, A.**, Brus, J. (2012). Advanced Map Optimization Based on Eye-tracking. *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)

- Çöltekin, A., Demšar, U., **Brychtová, A.**, and Vandrol, J. (2014). Eye-Hand Coordination During Visual Search on Geographic Displays. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research, s. 12–16.
- **Brychtová, A.** and Vondráková, A. (2014). Green versus Red: Eye-tracking evaluation of sequential colour schemes. SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings Volume III, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd. 8 s. doi:10.5593/SGEM2014/B23/S11.082. *(článek zatím není indexován)*
- **Brychtová, A.**, Popelka, S., and Dobešová, Z. (2012). Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles. SGEM 2012 Conference Proceedings Volume II, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., s. 1041–1048.
- **Brychtová, A.**, Popelka, S., and Voženilek, V. (2012). The analysis of eye movement as a tool for evaluation of maps and graphical outputs from GIS. Proceedings of the 19th international conference on Geography and Geoinformatics: Challenges for practise and education, Brno, Masarykova Univerzita, s. 154–162.

Publikace v konferenčním sborníku v databázi Scopus (D)

Papers in conference proceedings on the database Scopus (D)

- Çöltekin, A., Demšar, U., **Brychtová, A.**, and Vandrol, J. (2014). Eye-Hand Coordination During Visual Search on Geographic Displays. Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research, s. 12–16.
- **Brychtová, A.**, Popelka, S., and Dobešová, Z. (2012). Eye-tracking methods for investigation of cartographic principles. In SGEM 2012 Conference Proceedings Volume II, Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd. s. 1041–1048.

Publikace v konferenčním sborníku domácí (ostatní)

Papers in conference proceedings – Czech (other)

- Popelka, S., Vávra, A., and **Brychtová, A.** (2014). Eye-tracking hodnocení fenologických map. Aktivita v kartografii, Kartografická společnost Slovenskej republiky, Bratislava, 9 s.
- **Brychtová, A.**, Popelka, S. (2012). Eye-tracking v kartografii, Aktivita v kartografii, Kartografická společnost Slovenskej republiky, s. 20–28.

Publikace v konferenčním sborníku zahraniční (ostatní)

Papers in conference proceedings – foreign (other)

- **Brychtová, A.** (2014). Evaluation of Colour Schemes Usability in Atlas of the Phenological Conditions in Czechia. Third InDOG doctoral conference, s. 24–27.
- **Brychtová, A.**, Popelka, S. (2013). Exploring the Influence of the Color Distance on the Map Legibility. Proceedings of 26th ICA Conference, Dresden, 5 s.
- **Brychtová, A.** (2013). Color Distance on Maps. Second InDOG doctoral conference, Univerzita Palackého v Olomouci, s. 16–19.

- **Brychtová, A.** (2012). Visual distance of map symbols: evaluation of map readability with eye-tracking. First INDOG doctoral conference, Univerzita Palackého v Olomouci, 4 s.

Ostatní publikace autora / Another author's publications

Zahraniční publikace / Foreign publications

- Pászto, V., **Brychtová, A.**, and Marek, L. (2015). On Shape Metrics in Cartographic Generalization: A Case Study of the Building Footprint Geometry, *Modern Trends in Cartography*, Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-07926-4. (**budena WoS**)
- Pászto, V., **Brychtová, A.**, Tuček, P., Marek, L., and Burian, J. (2014). Using a fuzzy inference system to delimit rural and urban municipalities in the Czech Republic in 2010. *Journal of Maps*, s. 1–9. (**Scopus, WoS**)
- **Brychtová, A.**, Pászto, V., Marek, L., and Pánek, J. (2013). Web-design evaluation of the Crisis Map of the Czech Republic using eye-tracking. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM Vol. I, Sofia, Bulgaria*, s. 1065–1072. (**Scopus, WoS**)
- Popelka, S., **Brychtová, A.**, Svobodová, J., Brus, J., and Doležal, J. (2013). Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking. *21st International Conference on Geoinformatics*, pp. 1–6. (**Scopus, WoS**)
- Popelka, S., Dvorský, J., **Brychtová, A.**, and Hanzelka, J. (2013). User Typology based on Eye-movements Paths. *SGEM 2013 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings, Vol. I, Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd.*, s. 1041–1048. (**Scopus, WoS**)
- Popelka, S. and **Brychtová, A.** (2012). The historical 3D Map of Lost Fortress Creation. *Proceedings of the 9th International Conference on Geography and Geoinformatics: Challenge for Practise and Education, Brno, Masarykova Univerzita*, s. 147–153. (**WoS**)
- Voženílek, V., **Brychtová, A.**, Vondráková, A., Michalík, J. (2012). *Atlas of Special Educational Centres in the Czech Republic. Service-Oriented Mapping 2012*, Jobstmedia Management Verlag, Wien, 613 s.
- Brus, J., Popelka, S., **Brychtová, A.**, Svobodova, J. (2012). Exploring Effectiveness of Uncertainty Visualization Methods by Eye-Tracking. *Proceeding of the 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Florianopolis, Brazil*, s. 10–13.
- 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.**, Tsorlini, A. (2011). Differences of Ptolemy based cartography of Central Europe with respect to recent Czech Republic representations. *e-Perimtron, Vol. 6, No. 2*, s. 96–113.
- **Brychtová, A.**, Voženílek, V. (2011). 3Discworld: automatic preparation and visualization of 3D spatial data with use of planar data. *Proceedings of the 25th International Cartography Conference, Paris*, 12 s.

- Popelka, S., **Brychtová, A.**, Brus, J. (2012). Evaluation of user preferences during reading of 2D and 3D cartographic visualizations. Conference Proceedings SWAET 2012, Scandinavian Workshop on Applied Eye Tracking Karolinska Institutet, Stockholm, s 39.
- **Brychtová, A.**; Popelka, S. (2011). Visualization of spatio-temporal changes of the Olomouc city. Proceedings of 6th international workshop Digital approaches to Cartographic heritage. Haag, Netherlands, 18 s.

Domácí publikace / Czech publications

- Voženílek, V., Vondráková, A., **Brychtová, A.** (2013). Datový model mapy – formalizovaný způsob zápisu sestavení mapy z dat GIS. Geodetický a kartografický obzor, ročník 59/101, číslo 8, s. 182-186.
- Voženílek, V., Michalík, J., **Brychtová, A.**, Vondráková, A. (2013): Atlas činnosti Speciálně pedagogických center v České republice. Univerzita Palackého v Olomouci.
- **Brychtová, A.**, Popelka, S. (2012). Eye-tracking v kartografii, Aktivity v kartografii, Kartografická společnost Slovenskej republiky, s. 20-28.
- Pászto, V., **Brychtová, A.**, Sedoník, J., Marek, L., Kuprová, L., Tuček, P., Voženílek, V. (2012). Obce České republiky - příslušnost k venkovskému a městskému prostoru k 31. 12. 2010. Univerzita Palackého v Olomouci, 32 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.**, Harbula, J., Voženílek, V. (2011). Kartografická vizualizace služeb speciálně pedagogických center na webu. Zborník referátov 19. kartografickej konferencie Kartografická spoločnosť Slovenskej republiky, 221 s.
- **Brychtová, A.**; Popelka, S. (2011). Kartometrická analýza raportního plánu Tereziánské pevnosti Olomouc. Zborník recenzovaných príspevkov, Bratislava, 6 s.
- Popelka, S.; **Brychtová, A.** (2011). Možnosti geovizualizace historického města Olomouce. Zborník recenzovaných príspevkov, Bratislava, 6 s.

1. Annotation

The main objective of the dissertation thesis was to investigate the effect of color distance on the readability of visualized spatial information in the map. To achieve the goal, it was necessary to study the issue of human perception of the color, determine methods of color description and choose the most appropriate method for calculating the color distance metric.

There are three main aims of the thesis.

Firstly, author aims to examine current practices that are applied by experienced cartographers while map making. The emphasis was put in the procedures associated with using and reproducing colors on maps. Further the evaluation of the color management systems in various software (GIS, cartographic, DTP, web browsers and experimental) was performed. Finally the analysis of the ColorBrewer 2.0 tool was done in order to find out values of color distances, which are commonly, however unconsciously, applied on maps.

In the second part a qualitative research was performed to evaluate the effect of the color distance on the map readability. Eye-tracking and questionnaire were used to determine efficiency and strategy of participants. In total six experimental studies were performed.

The third thesis objective was to design and develop an application for generating sequential color schemes for choropleth maps. User can manipulate colors, number of classes of the scheme and visual difference between them by applying color distance steps defined by CIEDE2000 method. The Sequential Color Scheme Generator is available at <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

Keywords:

Cartography, eye-tracking, usability, readability, color, color distance

2. Summary

For successful transmission of spatial information by a map it is necessary to allow its' users to identify the meaning of map symbols comparing them with a legend and distinguish them from other symbols by applying appropriate visual variables. Colour is a very dominant visual stimulus, and therefore, one of the most important elements in map design. The use of colour in map design typically follows cartographic conventions based on centuries of practice and scholarship.

To quantify human ability to recognize the difference between colours, we employ the colour distance metric ΔE as introduced by International Commission on Illumination (CIE). Colorimetry scientists have been developing quantitative methods to accurately describe the colour distance as a metric and experimentally verifying whether two colours are distinguishable to the human eye. These efforts are also useful to define optimum colour differences for distinguishing map symbols in cartography.

Presently, among the colour-distance models, CIEDE2000 (ΔE_{00}) is regarded as the best coinciding with subjective visual perception. CIEDE2000 (ΔE_{00}) normalizes *brightness*, *hue*, and *saturation* of the visual perception to the same unit. When compared to other colour distance formulas, CIEDE2000 appears to be more reliable when applied to very small colour differences (<1) as well as very large colour differences (>10) and thus it is appropriate for describing visual difference between map symbols and it has been applied in all color distance computations in this thesis.

The main objective of the dissertation thesis was to systematically investigate the effect of color distance on the readability of visualized spatial information in the map. To achieve the goal, it was necessary to study the issue of human perception of the color, determine methods of color description and choose the most appropriate method for calculating the color distance metric.

There are three main aims of the thesis.

Firstly, author aims to examine current practices that are applied by experienced cartographers while map making. The emphasis was put in the procedures associated with using and reproducing colors on maps. Further the evaluation of the color management systems in various software (GIS, cartographic, DTP, web browsers and experimental) was performed. Finally the analysis of the ColorBrewer 2.0 tool was done in order to find out values of color distances, which are commonly, however unconsciously, applied on maps.

In the second part a qualitative research was performed to evaluate the effect of the color distance on the map readability. Eye-tracking and questionnaire were used to determine efficiency and strategy of participants. In total six experimental studies were performed:

1. *Labels*: Investigating the influence of color distance and font size on the map labelling readability
2. *Schemes*: Investigating the influence of color distance between classes of sequential and qualitative color schemes on their distinguishability
3. *Euclid*: Investigating the influence of spatial and color distance between map symbols on their distinguishability
4. *Order*: Investigating the influence of the legend position and the order of sequential schemes classes on the map readability
5. *Optimization*: Optimizing the color distance in sequential color schemes
6. *Hue*: Investigating the influence of sequential color schemes hue

Results of presented experimental studies were published in English in following articles:

Brychtová, A. and Çöltekin, 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*, published online ahead an issue.

Brychtová, A. (2014), "Exploring the influence of colour distance and legend position on choropleth maps readability", in Brus, J., Vondráková, A. and Voženilek, V. (Eds.), *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014, Lecture No.*, pp. 315–326.

Brychtová, A. and Vondráková, A. (2014), "Green versus Red: Eye-tracking evaluation of sequential colour schemes", *SGEM 2014 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Proceedings Volume III*, STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, p. 8.

The third thesis objective was to design and develop an application for generating sequential color schemes for choropleth maps. User can manipulate colors, number of classes of the scheme and visual difference between them by applying color distance steps defined by CIEDE2000 method. The Sequential Color Scheme Generator is available at <http://eyetracking.upol.cz/color/>.

Mgr. Alžběta Brychtová

BAREVNÁ VZDÁLENOST V KARTOGRAFII
COLOR DISTANCE IN CARTOGRAPHY

Určeno pro studenty, partnerská akademická pracoviště a veřejnost.

Výkonný redaktor prof. RNDr. Zdeněk Dvořák, DrSc. et Ph.D.

Odpovědná redaktorka Mgr. Jana Kreiselová

Technická redakce Mgr. Alžběta Brychtová

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 978-80-244-4548-9

Neprodejná publikace