

**Univerzita Palackého v Olomouci**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Katedra geoinformatiky**

**VYUŽITÍ REKURENTNÍ KVANTIFIKAČNÍ  
ANALÝZY PRO INTERPRETACI OČNÍCH  
POHYBŮ PŘI ČTENÍ STATICKÝCH MAP**

**Bakalářská práce**

**František BRANDEJS**

**Vedoucí práce Mgr. Michaela Vojtěchovská**

**Olomouc 2026**

**Geoinformatika a kartografie**



## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zaměřuje na analýzu kognitivních strategií uživatelů při interpretaci statických kartografických děl pomocí záznamu očních pohybů. K této analýze byla využita pokročilá nelineární metoda Rekurentní kvantifikační analýzy (RQA), která na rozdíl od tradičních lineárních metrik umožňuje odhalit skryté dynamické struktury a systematickosti v sekvencích fixací. Pro splnění zadání práce byla použita již naměřená data z experimentu diplomové práce Uživatelské testování barevných stupnic v kartografii (Vítková 2024). Data jsou analyzována ve třech scénářích pomocí metrik RQA, konkrétně Recurrence rate, Determinismus, Laminarita. Na základě výsledků je v autorově práci použitelnost RQA v kartografii kriticky posouzena a zároveň je na základě získaných poznatků doporučen přístup, kterým je možné RQA v kartografii aplikovat nejvhodněji. Dosaženým výsledkem práce je výpočetní a metodický základ pro aplikaci RQA v kartografickém výzkumu. Práce demonstruje schopnost metrik detekovat rozdíly ve vizuálních strategiích jednotlivých uživatelů v procesu map-use.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Sledování očních pohybů, rekurentní kvantifikační analýza, interpretace map, kognitivní strategie, nelineární analýza

Počet stran práce: 47

Počet příloh: 6 (z toho 6 volné a 6 elektronické)

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis focuses on analyzing users' cognitive strategies when interpreting static cartographic works using eye-tracking data. For this analysis, an advanced nonlinear method called Recurrent Quantification Analysis (RQA) was used, which, unlike traditional linear metrics, allows for the detection of hidden dynamic structures and systematic patterns in fixation sequences. To fulfill the thesis assignment, previously collected data from the experiment in the master's thesis *User Testing of Color Scales in Cartography* (Vítková 2024) was used. The data are analyzed in three scenarios using RQA metrics, specifically Recurrence Rate, Determinism, and Laminarity. Based on the results, the author critically assesses the applicability of RQA in cartography and, based on the findings, recommends an approach for the most suitable application of RQA in cartography.

The result of this work is a computational and methodological foundation for the application of RQA in cartographic research. The work demonstrates the ability of these metrics to detect differences in the visual strategies of individual users in the map-use process.

## **KEYWORDS**

Eye tracking, recurrent quantification analysis, map interpretation, cognitive strategies, nonlinear analysis

Number of pages: 47

Number of appendixes: 6

**Prohlašuji, že**

- bakalářskou/diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom(a), že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé bakalářské/diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Děkuji vedoucí práce Mgr. Michaele Vojtěchovské za trpělivost a vřelý přístup při vypracování bakalářské práce. Téměř neustálá dostupnost a možnost konzultace byla naprosto klíčovým aspektem v dokončení této práce. Poděkování patří i obyvatelům pokoje 603 na Studentské koleji Bedřicha Václavka blok C, za vytvoření motivovaného tvůrčího prostředí, které se ukázalo jako klíčové k dokončení práce.

# UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2024/2025

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: František BRANDEJS  
Osobní číslo: R23649  
Studijní program: B0532A330011 Geoinformatika a kartografie  
Téma práce: Využití rekurentní kvantifikační analýzy pro interpretaci očních pohybů při čtení map  
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

### Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je posoudit využitelnost rekurentní kvantifikační analýzy (RQA) pro interpretaci vzorců očních fixací při čtení map. Student se seznámí s metodikou RQA a provede analýzu již zaznamenaných dat z kartografických eye-tracking experimentů realizovaných Katedrou geoinformatiky PFF UP v Olomouci.

Analýza bude provedena alespoň ve třech scénářích, například: (1) srovnání metrik RQA mezi skupinami uživatelů (např. nováčci vs. experti), (2) porovnání metrik RQA pro fixace v mapovém poli a legendě za účelem identifikace rozdílů ve vizuálních strategiích při práci s různými částmi mapy a (3) analýza časového vývoje metrik RQA během interpretace mapového obsahu. Výzkum se zaměří na klíčové RQA metriky, jako je determinismus (DET) a laminarita (LAM).

Analýza bude provedena s důrazem na replikovatelnost v open-source prostředí, například využitím otevřených softwarových nástrojů nebo implementací analytických skriptů v Jupyter Notebooku. Výsledné materiály budou zpřístupněny v otevřeném repozitáři. Výstupem práce bude zhodnocení relevance metrik RQA pro analýzu interakce uživatelů s mapami a formulace doporučení pro eye-tracking výzkumníky k efektivnímu využití této metody při analýze map-use.

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran  
Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Forma zpracování bakalářské práce: elektronická

### Seznam doporučené literatury:

- Anderson, N. C., Bischof, W. F., Laidlaw, K. E. W., Risko, E. F., & Kingstone, A. (2013). Recurrence quantification analysis of eye movements. *Behavior Research Methods*, 45(3), 842–856. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0299-5>
- Fairbairn, D., & Hepburn, J. (2023). Eye-tracking in map use, map user and map usability research: What are we looking for? *International Journal of Cartography*, 9(2), 231–254. <https://doi.org/10.1080/23729333.2023.2189064>
- Klein, C., & Ettinger, U. (Eds.). (2019). *Eye movement research: An introduction to its scientific foundations and applications* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5>
- Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5–6), 237–329. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>
- Vaidyanathan, P., Pelz, J., Alm, C., Shi, P., & Haake, A. (2014). Recurrence quantification analysis reveals eye-movement behavior differences between experts and novices. In *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (pp. 303–306). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2578153.2578207>

**Zadání 2. strana**

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Michaela Vojtěchovská**  
Katedra geoinformatiky

Datum zadání bakalářské práce: **5. května 2025**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **4. května 2026**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(předmět: geoinformatika)

*(The following text is extremely faint and largely illegible due to the image quality. It appears to contain the main body of the assignment, including a title, a description of the task, and possibly a list of references or a table of contents. The text is mirrored and bleed-through from the reverse side of the page.)*

L.S.

\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.  
děkan

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 9. října 2025

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>13</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>14</b>
1.1 Eye-tracking v kognitivní kartografii .....	14
1.2 Rekurentní kvantifikační analýza (RQA) .....	14
1.2.1 Rekurence .....	15
1.2.2 Rekurentní graf .....	16
1.2.3 Metriky RQA .....	17
1.3 Využití RQA pro eye-tracking výzkum v kartografii .....	18
<b>2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>20</b>
2.1 Použitá data .....	20
2.1.1 Experiment hodnocení barevných stupnic .....	20
2.1.2 Vymezená AOI .....	21
2.1.3 Datová struktura .....	21
2.2 Využití RQA .....	22
2.2.1 Realizace scénářů .....	23
2.2.2 Doplnující scénáře .....	23
<b>3 PYTHON SKRIPT PRO ZPRACOVÁNÍ DAT .....</b>	<b>24</b>
3.1 Prostředí Google Colab .....	24
3.1.1 Použité knihovny .....	24
3.1.2 Princip částečného uživatelského prostředí .....	24
3.2 Průběh skriptu .....	25
3.2.1 Nastavení cest k souborům .....	25
3.2.2 Výběr stimulů a vyloučení nežádoucích respondentů .....	26
3.2.3 Sloučení dat a úprava AOI .....	26
3.2.4 Filtrace odlehlých hodnot .....	28
3.2.5 Výpočet radiusu pro XY přístup .....	28
3.2.6 Výpočet RQA metrik .....	29
3.2.7 Vizualizace .....	30
<b>4 VÝSLEDKY SCÉNÁŘŮ .....</b>	<b>32</b>
4.1 Scénář 1 .....	32
4.2 Scénář 2 .....	33
4.3 Scénář 3 .....	35
4.3.1 Srovnání napříč participanty a stimuly .....	37
4.4 Doplnující scénáře .....	41
4.4.1 Doplnující scénář 1 .....	41
4.4.2 Doplnující scénář 2 .....	42
<b>5 DOPORUČENÍ PRO BUDOUCÍ VÝZKUMNÍKY .....</b>	<b>44</b>
5.1 Návrh experimentu a specifiky stimulů .....	44

5.1.1	Oblasti zájmu (AOI) .....	44
5.1.2	Struktura úlohy .....	44
5.2	Implementace RQA .....	45
5.2.1	Výpočet rádiusu XY přístupu .....	45
5.2.2	Souběžné použití obou přístupů .....	45
5.3	Interpretace výsledků .....	45
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b> .....	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE</b> .....	<b>50</b>
	<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AerT	Aerobní práh (Aerobic Threshold)
AOI	Oblast zájmu (Area of Interest)
csv	Comma-separated values (formát datového souboru)
DET	Determinismus
ET	Eye-tracking (sledování očních pohybů)
EWSs	Signály včasného varování (Early Warning Signals)
HR	Srdeční frekvence (Heart Rate)
ID	Identifikátor
IQR	Mezikvartilové rozpětí (Interquartile Range)
LAM	Laminarita
PPI	Hustota obrazových bodů (Pixels Per Inch)
Přf UP	Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci
RP	Rekurenční graf (Recurrence Plot)
RQA	Rekurenční kvantifikační analýza
RR	Míra rekurence (Recurrence Rate)
RRQA	Běžící/časově dynamická rekurenční kvantifikační analýza (Running RQA)
WoS	Web of Science (vědecká databáze)
XY	Označení pro metrický přístup využívající euklidovskou vzdálenost a souřadnice X a Y

## ÚVOD

Porozumění tomu, jak člověk vnímá a interpretuje vizuální informace, je klíčovým úkolem kognitivní vědy. V oblasti kartografie a geoinformatiky je tato snaha zaměřena na komplexní proces čtení mapy (map-use) – proces, který zdaleka není pasivní, ale představuje aktivní interakci mezi uživatelem a grafickou reprezentací prostorových dat (mapou). Pro analýzu tohoto dialogu se stal standardním nástrojem eye-tracking, který umožňuje objektivně měřit, kam a jak dlouho se uživatel dívá.

Tradičně se v kartografii k analýze skenovacích drah používají lineární metriky, jako je počet a průměrná délka fixací nebo celková doba skenování. Přestože tyto metody poskytují užitečný přehled o tom, kam byla upřena pozornost účastníka, zjednodušují komplexní časovou a prostorovou dynamiku skenování a nemusí zachytit detailní charakter kognitivních procesů. Čtení mapy může být totiž vysoce nelineární proces plný návratů, ověřování informací a postupného poroumění. Vystává tak potřeba aplikovat pokročilejší analytické přístupy, které by tyto skryté strategie dokázaly přesněji kvantifikovat a posunout výzkum od statického popisu vizuální pozornosti k hlubšímu studiu.

Odpovědí na tuto výzvu je rekurentní kvantifikační analýza (RQA), metoda pocházející z nelineární dynamiky, jež nachází uplatnění v kognitivních vědách jako nástroj k odhalení skrytých struktur v časových řadách. Předložená bakalářská práce na tyto analytické trendy přímo navazuje.

## CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je posoudit využitelnost rekurentní kvantifikační analýzy (RQA) pro interpretaci očních pohybů při čtení statických map. K dosažení tohoto hlavního vytyčeného cíle bylo využito dat zaznamenaných během předchozího kartografického eye-tracking experimentu realizovaného Katedrou geoinformatiky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci. V rámci důrazu na replikovatelnost a možnost na bakalářskou práci navázat byl vytvořen ucelený, interaktivní open-source analytický nástroj v prostředí Google Colab. Tento přesah umožňuje nejen splnit vytyčené analytické scénáře, ale vytváří prostor pro další výzkum v oboru.

Prvním dílčím cílem je detailní seznámení se s metodikou rekurentní kvantifikační analýzy (RQA), jejími matematickými principy a možnostmi aplikace v kontextu eye-trackingu a kognitivní kartografie. Druhý dílčí cíl spočívá v návrhu a naprogramování interaktivního skriptu v jazyce Python. Tento krok zahrnuje implementaci postupů pro filtraci odlehklých hodnot (outlierů), matematický výpočet foveálního rádiusu a vytvoření grafického uživatelského rozhraní, které zpřístupní algoritmus i uživatelům bez zkušeností s jazykem Python. Aby bylo možné objektivně posoudit využitelnost metody, byl původní cíl rozšířen o aplikaci a následnou komparaci dvou odlišných přístupů výpočtu: AOI (založeného na textové shodě oblastí zájmu) a XY (založeného na euklidovské geometrii a fyzickém rádiusu na monitoru).

Třetím dílčím cílem je praktická aplikace metrik (zejména Determinismu a Laminarity) na experimentální data. Původní zadání požadující hodnocení tří aspektů bylo v průběhu řešení rozšířeno na šest ucelených scénářů. Analýza tak pokrývá: (1) globální srovnání metrik mezi nováčky a experty, (2) porovnání vizuálních strategií mezi mapovým polem a legendou, (3) analýzu časové dynamiky metrik (Running RQA). V průběhu byl postup doplněn o další doplňkové scénáře, (1) hodnocení vlivu složitosti legendy (počtu intervalů) na metriky RQA, (2) hodnocení vlivu počtu fixací v sekvenci na metriky RQA.

Závěrečným dílčím cílem je kritické zhodnocení získaných poznatků a vyvození závěrů o relevanci jednotlivých RQA metrik pro interpretaci interakce uživatele s mapou. Na základě těchto zjištění bude formulována sada doporučení pro kartografy a eye-trackingové výzkumníky.

Výsledky a výstupy této práce umožní výzkumníkům v oblasti kognitivní kartografie objektivněji a exaktněji kvantifikovat skryté strategie probíhající při čtení map, které nelze odhalit standardními prostorovými metrikami. Sestavený open-source nástroj urychlí a výrazně zjednoduší standardizované nasazení RQA analýzy na nová data. Vytvořený metodický postup a kód tak najde své uplatnění nejen jako teoretický průvodce, ale především jako praktický výpočetní rámec pro budoucí oční experimenty napříč oborem.

# 1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

## 1.1 Eye-tracking v kognitivní kartografii

Eye-tracking slouží jako metoda pro záznam pohybu očí, která poskytuje vhled do kognitivních procesů člověka. Toho dosahuje sledováním, kam je zaměřena vizuální pozornost s vysokou rozlišovací schopností (Henderson a Ferreira 2004). Eye-tracking vychází z „hypotézy oko-mysl“ (eye-mind hypothesis) (Chekaluk a Llewellyn 1992), která předpokládá, že pohyb očí je důkazem o zjevné pozornosti. Analýza očních pohybů je proto cenná pro zkoumání lidského chování, rozhodovacích strategií a vysvětlování kognice (Koop a Johnson 2011). I přes vysokou míru informativnosti čelí eye-tracking několika praktickým omezením, zejména vysokým nákladům, nutnosti provádět měření ve specializovaném laboratorním prostředí a efektivní interpretace velkého objemu dat (Cairns a Cox 2008). Nicméně, při správném použití se jedná o efektivní nástroj pro uživatelské testování (Carter a Luke 2020).

Kognitivní kartografie, jakožto podobor zaměřený na studium percepčních, mentálních a kognitivních procesů spojených s mapami, využívá eye-tracking jako jednu z metod pro objektivní zkoumání interakce uživatele a mapy (Popelka 2018). Eye-tracking poskytuje přímé a neinvazivní měření vizuální pozornosti, což je zásadní pro hodnocení kvality či efektivity mapového designu, posuzování kognitivní zátěže během čtení mapy, navigace, a pro verifikaci kartografických pravidel (Popelka 2018).

Tradičně se v kartografii k analýze skenovacích drah (scanpaths) používají lineární metriky, jako je počet a průměrná délka fixací, celková doba skenování nebo analýza oblastí zájmu (AOI), přičemž tyto metriky dávají přehled o tom, kam se uživatel díval. Problémem těchto přístupů však je, že zjednodušují komplexní časovou a prostorovou dynamiku skenování (Pérez et al. 2018).

Oční pohyby lze kategorizovat do dvou typů chování. Fixace, jakožto moment, při kterém jsou oči stacionární, a sakády, rychlé pohyby mezi jednotlivými fixacemi.

Fixace představují klíčovou a nejpřínosnější funkci očí pro zjištění, jak uživatel zpracovává vizuální informace a interaguje s podněty. Fixace jsou definovány jako krátké pauzy, kdy je oko stabilizováno nad určitým bodem. Během fixace, která standardně trvá 100 až 600 milisekund, je mozek aktivně zapojen do kognitivního zpracování vizuálních podnětů, které v daném okamžiku vnímá. Délka fixace je tak často používána jako aproximace pro odhad kognitivní zátěže nebo obtížnosti interpretace daného vizuálního podnětu (Fairbairn a Hepburn 2023).

Sakády jsou definovány jako velmi rychlý pohyb očí mezi jednotlivými fixacemi. Tento pohyb mezi fixacemi obvykle trvá 20 až 40 milisekund (Holmqvist et al. 2011).

## 1.2 Rekurentní kvantifikační analýza (RQA)

Rekurentní kvantifikační analýza (dále RQA) je metodou nelineární dynamiky, která umožňuje odhalit a zároveň kvantifikovat skryté vzorce, opakování a podmíněnost dat časových řad, i když se na první pohled mohou jevit jako chaotické, či dokonce náhodné. (Marwan et al. 2007)

Mezi první a vlivné použití RQA patří aplikace RQA na fyziologická data (Webber a Zbilut 1994). Studie ukázala, že RQA je schopna rozlišit mezi zdravými a patologickými stavy organismu na základě změn v předvídatelnosti časových řad respirační periody dýchacího cyklu krys. V moderní aplikaci RQA (Zimatore et al. 2024), aplikovaná na časové řady srdeční frekvence (HR), sloužila k automatické a spolehlivé detekci aerobního prahu (AerT) u různých skupin, včetně kardiaků a obézních pacientů.

RQA byla využita také v klimatologii a ekologii. (Dakos et al. 2024) ve své přehledové studii potvrdili, že RQA (a související metriky) jsou součástí rozsáhlého souboru nástrojů určených k detekci signálů včasného varování (Early Warning Signals, EWSs). Tyto signály slouží k předpovídání bodů zvratu (tipping points) – náhlých, nevratných změn v systémech, jako je klima nebo ekologie – přestože se vnější podmínky mění pozvolna (Dakos et al. 2024). (Santana et al. 2020) aplikovali RQA na časové řady měsíčních srážek v Brazílii, kde RQA sloužila k odhalení, jak se dynamické a predikční charakteristiky regionálního klimatu liší v závislosti na zeměpisné zóně a jak jsou ovlivněny lidskou činností.

Zároveň je RQA inovativním nástrojem v kognitivních vědách a eye-trackingu, kde pomáhá překonat limity tradičních metrik. (Vaidyanathan et al. 2014) použili RQA k porovnání očních pohybů u odborníků (dermatologů) a nováčků. RQA metriky ukázaly, že experti měli méně repetitivní a více náhodné skenovací dráhy než nováčci.

### 1.2.1 Rekurence

Rekurence obecně znamená opětný výskyt stejného stavu systému v různých časech. V kontextu dynamických systémů se rekurencí rozumí návrat trajektorie systému do fázového prostoru (vícerozměrný prostor definovaný stavovými proměnnými) do dříve navštívené blízkosti (Marwan et al. 2007). Systémy, které vykazují rekurenci, nejsou stochastické, ale spíše deterministické, i když se na první pohled mohou jevit jako chaotické (Webber a Zbilut 1994).

První zmínkou o rekurencích lze považovat publikaci Acta Mathematica a její kapitolu Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique (Poincaré 1890), která položila, i přes svůj matematický základ, základ teoretické koncepce rekurencí. Avšak plné pozornosti a průlomu se dostalo až 70 let poté, nástupem rychlých a efektivních počítačů, které mohly být numericky využity. Použití výkonných počítačů podpořilo teorii chaosu a umožnilo studium nových systémů. Některé skutečně obtížné výpočty bylo možné provést, až použitím těchto digitálních prostředků (Marwan et al. 2007).

V dynamickém systému klimatu jsou stavovými proměnnými např. úhrn srážek, teplota vzduchu, tlak atd. Rekurence nastává, pokud je stavový vektor složený z těchto veličin dostatečně blízky jednomu z předchozích vektorů. Tyto vektory pak umožňují stav systému zobrazit ve fázovém prostoru jedním bodem. Při absenci veličin, které by popsaly systém je možné použít kategorickou RQA. Například v eye-tracking studii může být stavový vektor nahrazen navštívenou AOI (Pérez et al. 2018). Rekurence v eye-trackingu lze vymezit více způsoby:

### **Euklidovská vzdálenost**

Tento přístup řeší definice rekurencí striktně dle euklidovské vzdálenosti stavů ve fázovém prostoru. Důležitou konstantou je prahová vzdálenost, dle které je posouzena rekurentnost (Anderson et al. 2023). Při zkoumání vizuálního vnímání bylo jako prahová vzdálenost použito hodnota  $2^\circ$  zorného úhlu, což v čínlo 64 pixelů (Pérez et al. 2018). Aplikace RQA v návaznosti na tuto podmínku rekurence je označována jako Metrická RQA.

Ve specifickém kontextu analýzy očních pohybů jsou dvě fixace považovány za rekurentní, pokud jejich vzájemná prostorová vzdálenost klesne pod definovanou hranici, typicky 1 až 2 stupně zorného úhlu (Gurtner et al. 2019).

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & d(f_i, f_j) \leq \rho \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

### **Oblasti zájmu (Area of interest-AOI)**

Tato metoda definuje specifické AOI ve fázovém prostoru za účelem kategorizace. V aplikaci v eye-trackingu jsou dvě fixace jsou považovány za rekurentní, pokud obě spadají do stejné AOI. Matematicky, pokud  $AOI(f_i) = AOI(f_j)$ , kde  $AOI(f)$  označuje předdefinovanou oblast obsahující fixaci  $f$ , pak jsou fixace klasifikovány jako rekurentní. (Vojtechovska et al. 2025) Tato metoda je výhodná v odvětvích jako eye-tracking, kde jsou předmětem zájmu předdefinované oblasti, jako jsou tlačítka, textové sekce nebo obrázky. Aplikace RQA v návaznosti na tuto podmínku rekurence je označována jako Kategorická RQA.

### **Grid**

Přístup podobný pojetí string-edit dle (Cristino et al. 2010) Fázový prostor (v případě eye-trackingu skenovací plocha) je rozdělen do pravidelné mřížky a rekurence nastává, pokud stavy (v ET fixace)  $f_i$  a  $f_j$  náleží stejné buňce mřížky. Hlavní nevýhodou pro eye-tracking tohoto přístupu je okamžik, kdy rozložení mřížky spolehlivě neodpovídá fázovému prostoru (Anderson et al. 2023). (Anderson et al. 2023)

## **1.2.2 Rekurentní graf**

Rekurentní graf (dále RP) je grafickou reprezentací rekurentní matice. Ta porovnává jednotlivé stavy a vykreslí ty rekurentní. Samotný rekurentní graf je následně definován jako čtvercová binární matice, jejíž prvky  $r_{i,j}$  nabývají hodnoty 1, pokud je vzdálenost mezi dvěma rekonstruovanými stavy menší než stanovená prahová hodnota (Santana et al. 2020).

Pokud jsou dva stavové vektory rekurentní ( $r_{i,j} = 1$ ), je do rekurentního grafu zanesena rekurence na souřadnicích  $i, j$ . Stavové vektory jsou samy se sebou rekurentní, v případě  $i = j$ . Tudíž RP vždy vytváří diagonální linii (line of incidence). Posléze se tedy dá usoudit, že RP je dle této linie osově symetrický, jelikož  $i$  metriky vzdáleností stavových vektorů jsou symetrické (Anderson et al. 2023).

### 1.2.3 Metriky RQA

#### Míra rekurence (Recurrence Rate–RR)

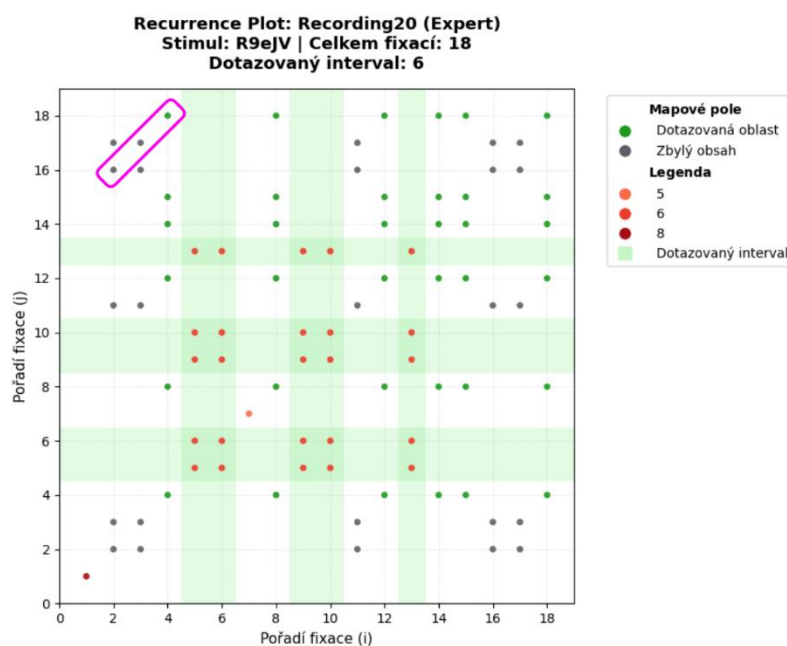
Recurrence Rate (RR) je nejjednodušší metrikou RQA a slouží k rychlému zhodnocení celkové hustoty rekurentních bodů v grafu. Měří frakci (procento) bodů v rekurentním grafu, které jsou rekurentní. Z hlediska interpretace udává RR pravděpodobnost, že se systém v průběhu své evoluce navrátí do stavu, který již dříve navštívil. Vysoká hodnota RR naznačuje, že systém je vysoce stabilní a jeho dynamika se často opakuje (Sylos Labini et al. 2012). Pro kontext eye-trackingu to znamená, jakou mírou uživatel znovu fixoval již zafixovaná místa. Větší vzdálenost mezi body v RP značí, že k návratu systému do stejného stavu (fixace v již skenovaném místě) došlo s větším odstupem (Anderson et al. 2023).

$$REC = 100 \frac{2R}{N(N-1)}$$

#### Determinismus (DET)

Determinismus je metrika, která odráží prediktabilitu systému a kvantifikuje, do jaké míry je jeho chování řízeno deterministickými pravidly. Počítá se jako frakce (procento) rekurentních bodů, které tvoří diagonální linie. Diagonální linie se v grafu (Obr. 1) objevují, když se sekvence vektorů (trajektorie) opakuje v čase, což ukazuje, že se vývoj stavů podobá v různých časových úsecích (Sylos Labini et al. 2012). V kontextu eye-trackingu vysoký DET indikuje, že se specifické sekvence fixací (scanpaths) opakují častěji, než by se dalo očekávat náhodou.

$$DET = 100 \frac{|D_L|}{R}$$

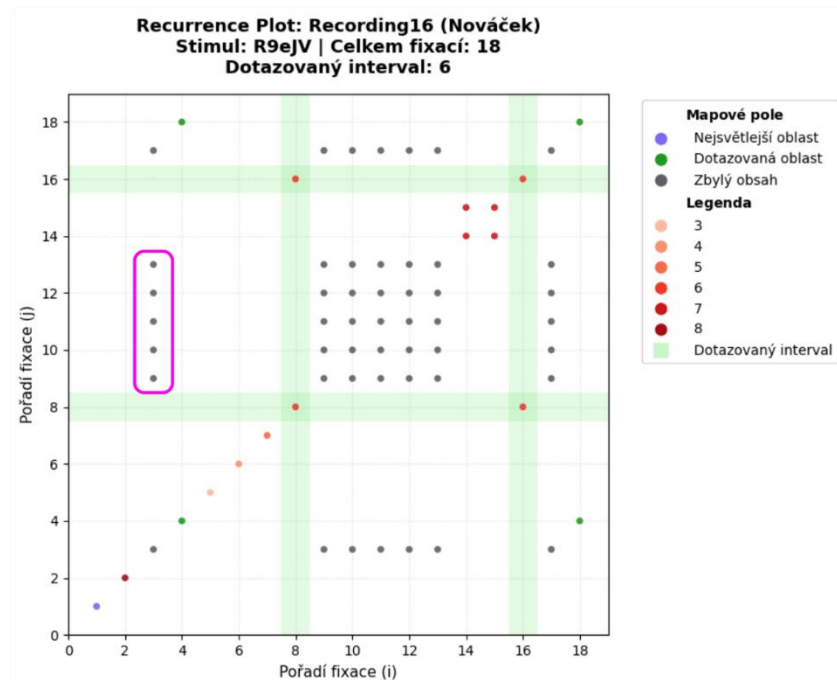


Obr. 1: Ukázka diagonální linie DET v RP

## Laminarita (LAM)

Laminarita je metrika, která odráží stabilitu systému a tendenci setrvávat v určitém stavu. Je definována jako frakce (procento) rekurentních bodů, které tvoří vertikální, či horizontální linie. Vertikální (nebo horizontální) linie se v grafu (Obr. 2) objevují, když systém setrvává ve stavu, který se nemění nebo mění velmi pomalu; tyto pomalu se měnící stavy jsou často označovány jako laminární stavy (Sylos Labini et al. 2012). Což například v aplikacích eye-trackingu signalizuje, že pozorovatel setrval ve stejné AOI po několika po sobě jdoucích fixacích za účelem detailního nebo hloubkového zpracování informací. Laminarita je tedy důležitým odhadem průměrného času (trapping time), po který systém zůstává uvězněn v konkrétním stavu.

$$LAM = 100 \frac{|H_L| + |V_L|}{2R}$$

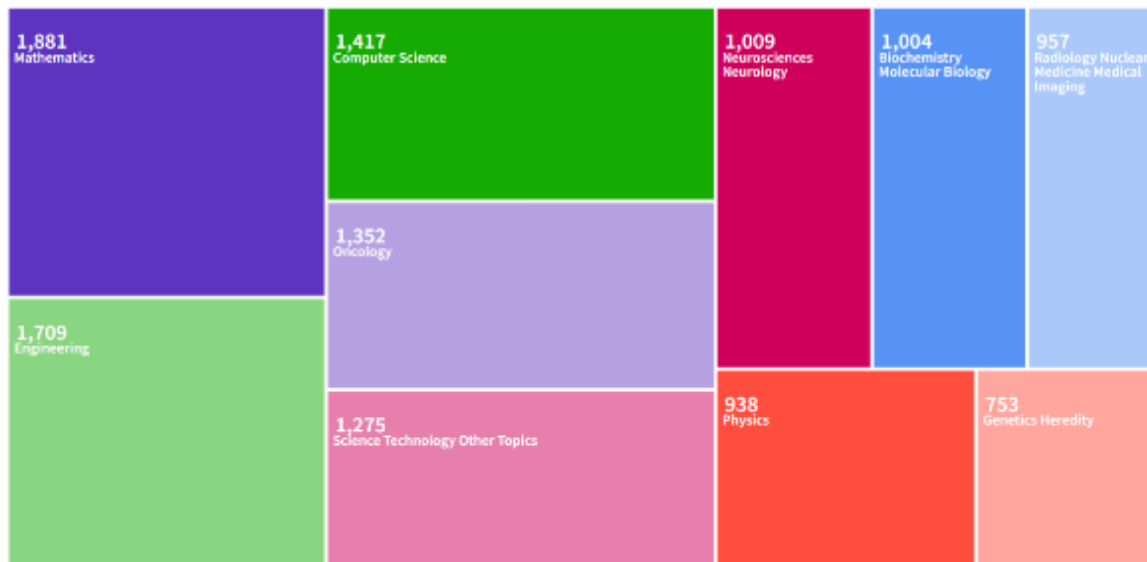


Obr. 2: Ukázka vertikální linie LAM v RP

## 1.3 Využití RQA pro eye-tracking výzkum v kartografii

V kartografii se mapy běžně používají jako stimuly a proces vnímání mapy je studován jako reakce jejího uživatele (Williams 1971). Rekurentní kvantifikační analýza (RQA) představuje v kontextu eye-tracking výzkumu v kartografii vychýlení od statického popisu vizuální pozornosti k hloubkovému studiu kognitivní dynamiky. Přestože je eye-tracking v kartografii etablovanou metodou (Popelka 2018), aplikace nelineárních metod typu RQA zůstává v tomto oboru dosud málo využitou oblastí, což otevírá prostor pro potenciální přínos.

Při rešerši současné literatury lze narazit na paradox: zatímco v obecné kognitivní vědě a jiných, četnost použití RQA roste (Anderson et al. 2023; Sylos Labini et al. 2012), avšak v kartografii se tato metoda objevuje jen sporadicky nebo v podobě pilotních studií (Popelka et al. 2024). Většina kartografických prací stále spoléhá na tradiční metriky, jako je počet fixací nebo doba setrvání v oblastech zájmu (AOI).



Obr. 3: Počet publikací a článků ve všech databázích doposud publikovaných dle Web of Science (WoS), které odpovídají dotazu (OR recurrence analysis OR recurrence plot OR recurrence quantification analysis rqa) k 17. 12. 2025 (zdroj: Clarivate).

Logické argumenty pro smysluplnost použití zahrnují:

### **Odhalení skrytých kognitivních strategií**

Tradiční metriky (AOI) výzkumníkům nemusí explicitně odhalit, zda uživatel mapu prochází systematicky, nebo chaoticky. RQA prostřednictvím metriky determinismu (DET) dokáže kvantifikovat míru opakování specifických sekvencí skenování, což přímo koreluje s efektivitou kognitivního zpracování mapy (Vaidyanathan et al. 2014).

### **Analýza bez nutnosti AOI**

Definování oblastí zájmu (AOI) je v kartografii často subjektivní a problematické (Šašinka et al. 2021). Metoda RQA založená na rekurencích definovaných dle euklidovské vzdálenosti umožňuje analyzovat dynamiku pohledu bez nutnosti předem uměle definovat hranice objektů v mapě (Anderson et al. 2023).

### **Kvantifikace kognitivní zátěže pomocí laminarity**

Metrika LAM v eye-trackingu indikuje setrvávání pohledu v určité oblasti (tzv. trapping time) (Gurtner et al. 2019). V kartografii to může být klíčový indikátor míst, kde je mapa příliš složitá nebo kde uživatel naráží na obtíže s interpretací symboliky.

## 2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

### 2.1 Použitá data

Za účelem hledání limitů, použitelnosti a specifik aplikace rekurentní kvantifikační analýzy pro interpretaci očních pohybů při čtení statických map byla určena již naměřená data.

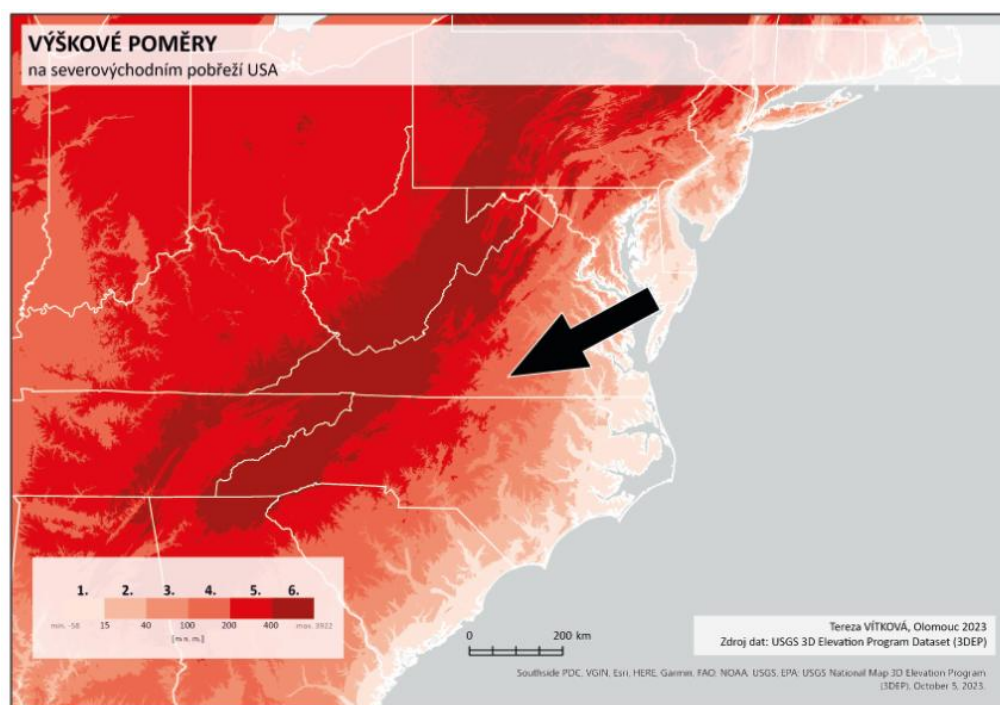
#### 2.1.1 Experiment hodnocení barevných stupnic

Jedná se o dataset z diplomové práce Mgr. Terezy Vítkové s tématem Uživatelské testování barevných stupnic v kartografii. Práce byla vypracována pod vedením doc. RNDr. Stanislava Popelky, Ph.D. na Katedře geoinformatiky a kartografie Univerzity Palackého Olomouc v roce 2024.

Předpokladem celého testování bylo, že s přibývajícím počtem intervalů v legendě stoupá i chybovost jednotlivých respondentů při plnění zadaného úkolu. Chybovost práce porovnávala z hlediska různých skupin respondentů, různých barevných stupnic a různých variant mapy.

Všechny vytvořené mapy zobrazovaly výškové poměry na části území Spojených států amerických (Obr. 4). Samotná nadmořská výška byla vizualizována pomocí barevných odstínů červené a zelené barvy, pro eye-tracking experiment byly vybrány pouze mapy s odstíny červené.

Samotný experiment probíhal dotazováním participanta na požadovaný odstín v mapě označený černou šipkou. Úkol participanta spočíval v přiřazení správného intervalu v legendě, odpovídající odstínu v mapě. (Vítková 2024)



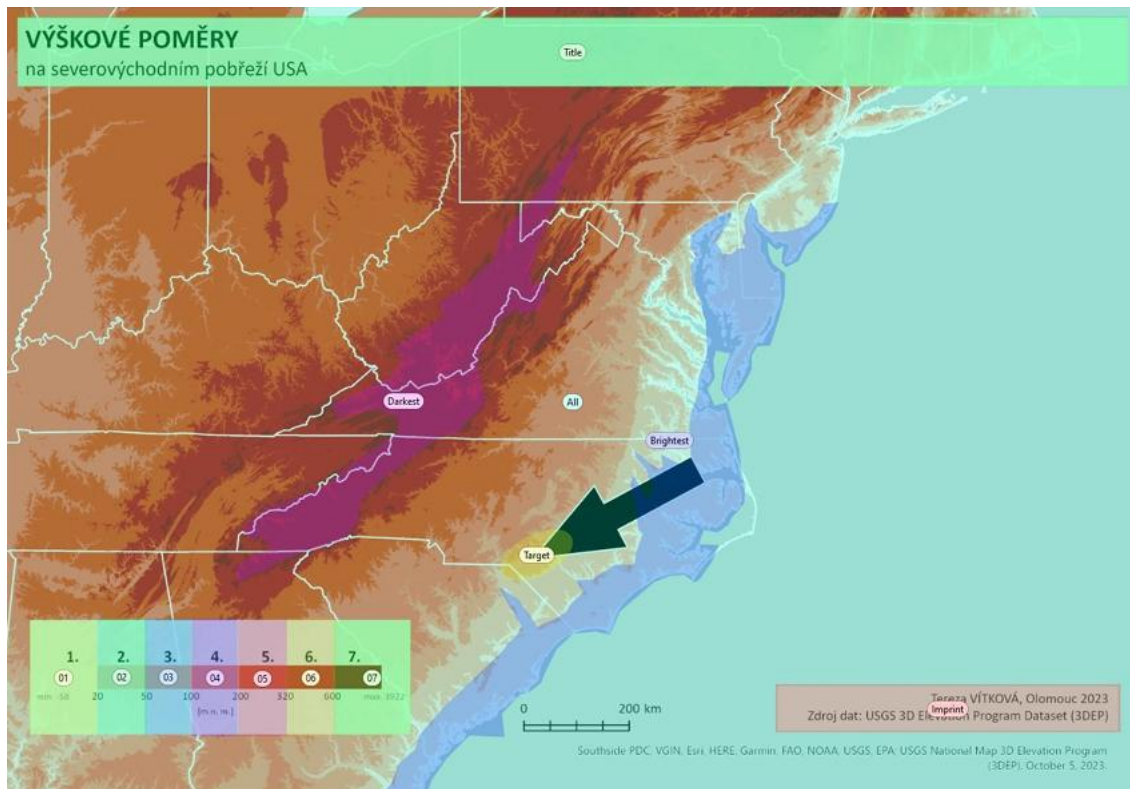
Obr. 4: Ukázka stimulu použitého při uživatelském testování (Vítková 2024).

## 2.1.2 Vymezená AOI

Pro realizaci RQA AOI přístupu k určení rekurentních fixací je třeba nadefinovaná AOI v testovaných stimulech. Vítková (2024) definovala celkem 11 až 15 oblastí zájmu. Počet se liší v závislosti na počtu barevných intervalů konkrétní legendy mapového stimulu. Toto vymezení AOI ke každému intervalu legendy bylo důležité, jelikož participant svou odpověď zaznamenával kliknutím myši do samotného stimulu na monitoru. (Vítková 2024)

Nadefinovaná AOI (Obr. 5):

- 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 – ohraničující jednotlivé intervaly legendy
- Brightest – nejsvětlejší odstín v mapě
- Darkest – nejtmavší odstín v mapě
- Imprint – tiráž mapy
- Target – oblast okolo šípky určující dotazovaný odstín v mapě
- Title – název mapy
- All – celé pole stimulu, překrývající ostatní AOI (Darkest, Brightest, Target, i celou legendu)



Obr. 5: Příklad navržených AOI.

## 2.1.3 Datová struktura

Pro získání již vhodně upraveného datasetu byla využita open-source webová aplikace GazePlotter vyvíjená na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého Olomouc (Vojtechovska a Popelka 2026).

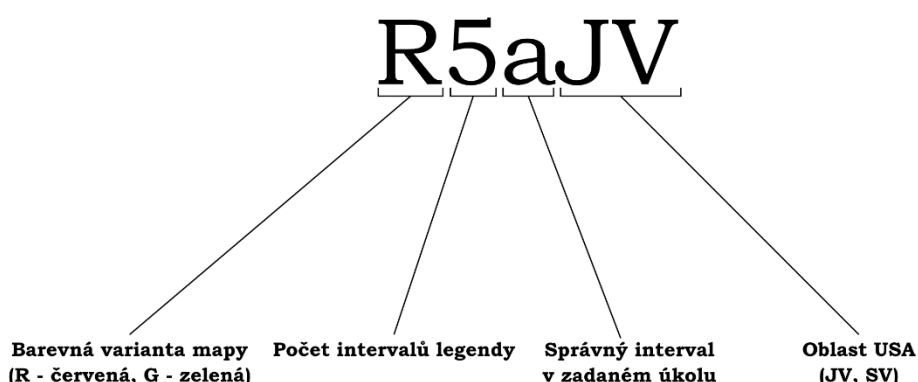
Funkcionalita nástroje umožňuje export fixací do formátu .csv. Samotný exportovaný soubor má celkem osm sloupců.

Sloupce a jejich obsah:

- stimulus – označení konkrétního stimulu (např. R5aJV)
- participant – ID participanta z experimentu
- timestamp – časový údaj počátku pohybu oka
- duration – doba trvání pohybu oka
- eyemovementype – typ očního pohybu, export z GazePlotter umožňuje exportovat jen fixace, tudíž nebylo potřeba filtrovat sakády, kalibraci zařízení atd.
- AOI – příslušná oblast zájmu stimulu
- x – konkrétní souřadnice fixace
- y – konkrétní souřadnice fixace

### Pojmenování stimulů

Pro identifikaci samotných stimulů bylo navrženo strukturované pojmenování (Obr. 6). Toto pojmenování je klíčové pro zpracování dat v bakalářské práci. Mapové stimuly byly vytvořeny ve 2 barevných variantách, pojmenování stimulů tedy začíná na R nebo G, dle příslušné barvy. Legendy ve všech stimulech mají 5 až 9 intervalů. Písmeno uprostřed označuje správný interval, na který ve stimulu ukazuje šipka a určuje tím dotazované místo pro participanta. Označení funguje logikou (slovníkem): a = druhý interval, b = třetí interval atd. V experimentu nebyl dotazován nejtmaší ani nejsvětější odstín čili první ani poslední interval legendy. Poslední dvě písmena názvu stimulu označují oblast USA (JV = jihovýchodní, SV = severovýchodní), kterou zobrazuje mapa.



Obr. 6: Strukturované pojmenování stimulu.

### AOI v datech

Sloupec AOI nabývá různých hodnot podle konkrétního definovaného AOI ve stimulu. Vlivem překryvu některých AOI obsahuje jedna buňka více AOI (např. All; Brightest). Stejně tak dochází k zápisu více AOI, když je fixace přesně na hranici dvou AOI, například na hranici dvou AOI legendy (01; 02; All)

## 2.2 Využití RQA

Cílem praktické části této bakalářské práce byla aplikace metody RQA na data z eye-tracking experimentu za účelem odhalení skrytých kognitivních strategií při čtení statických map. Pro zkoumání specifik použití a odhalení případných limitů analýzy byl výpočet realizován dvěma nezávislými způsoby: AOI přístup (s využitím definovaných oblastí zájmu – AOI) a prostorovým XY (využívajícím geometrickou euklidovskou

vzdálenost – přístup XY s fixním foveálním rádiusem). Na základě těchto dvou přístupů byly realizovány následující scénáře.

### **2.2.1 Realizace scénářů**

#### **Scénář 1: Srovnání metrik RQA mezi experty a nováčky**

Porovnává celkové kognitivní profily respondentů napříč všemi stimuly, s hlavním důrazem na identifikaci odlišností v přístupu expertů a nováčků.

Nováčci a experti jsou definováni v souladu s jejich kartografickými zkušenostmi a frekvence práce s kartografickými díly. V původních datech byla jejich úroveň expertízy zaznamenána čtyřmi úrovněmi (denně, několikrát týdně, několikrát měsíčně, velmi zřídka). Pro získání dvou úrovní zkušeností byly tyto záznamy reklasifikovány klíčem Expert = denně, Nováček = několikrát týdně, několikrát měsíčně, velmi zřídka. Po této úpravě dataset skýtal 32 expertů a 41 nováčků.

Předpokladem tohoto scénáře byl rozdíl kognitivních strategií nováčků a expertů v jednotlivých metrikách. Experti mají natrénovanou strategii pro čtení map, a to se promítne do jejich hodnot metrik, kdežto nováčci vlivem nezkušenosti provedou chaotické skenování stimulu.

#### **Scénář 2: Srovnání metrik uvnitř stimulů (porovnání metrik v legendě a mapovém poli)**

Izolovaně zkoumá a statisticky porovnává vizuální chování nad samotným mapovým polem oproti čtení informačně nahuštěného mapového klíče (legendy).

#### **Scénář 3: Časová dynamika strategií (Running RQA)**

Odkrývá vývoj metrik krok za krokem s přibývajícím časem (rostoucím počtem fixací) a identifikuje konkrétní vizuální prvky, jejichž zafixování způsobuje náhlé zlomy v uživatelském chování. Vizualizace RRQA poskytuje možnost provést kvalitativní exploratorní analýzu a odhalit tak přesný zlom, kdy se participant od náhodného „běhání“ po mapě přesunul ke strukturovanému a strategicky založenému procesu map-use.

### **2.2.2 Doplnující scénáře**

#### **Doplnující scénář 1: Hodnocení vlivu složitosti legendy (počtu intervalů) na metriky RQA**

Tento analytický scénář byl navržen za účelem kvantifikace dopadu kartografické složitosti na vizuální strategie respondentů. Cílem bylo zjistit, jakým způsobem se mění kognitivní zátěž (reprezentovaná metrikami RQA) v závislosti na narůstajícím počtu intervalů v legendě.

#### **Doplnující scénář 2: Hodnocení vlivu počtu fixací v sekvenci na metriky RQA**

V návaznosti na nepotvrzení některých scénářů byl přidán scénář pro posouzení vlivu počtu fixací na hodnotu metriky. Předpokladem bylo, že délka sekvence silně ovlivní finální hodnotu metriky. Velmi krátká sekvence (4 fixace) může nabývat vysokých hodnot kvůli charakteru výpočtu metrik, avšak s přibývajícím počtem fixací v sekvenci metriky (obzvláště RR) přirozeně stoupají a limitně se blíží maximální hodnotě 1.

## 3 PYTHON SKRIPT PRO ZPRACOVÁNÍ DAT

Pro práci s tabelárními daty, které v eye-tracking experimentech dominují, byl vybrán programovací jazyk Python pro jeho univerzálnost a široké rozšíření. Zároveň to vyhovovalo záměrům autora se s tímto jazykem seznámit pro následné využití v jiných aplikacích kartografie a geoinformatiky. Pro tvorbu a hlavně následný debugging byl využit programovací modul ve formě Gemu od Google Gemini AI.

### 3.1 Prostředí Google Colab

Veškeré výpočetní i vizualizační skripty v rámci bakalářské práce byly vyvinuté a provozované v cloudovém prostředí Google Colab. Jedná se o interaktivní prostředí postavené na platformě Jupyter Notebook, které umožňuje psaní a spouštění kódu v jazyce python přímo ve webovém prohlížeči.

Volba tohoto řešení byla motivována následujícími faktory. Především zcela eliminuje nutnost natavení lokálního běhového prostředí a nutnost instalace specifických knihoven na zařízení uživatele. Tímto je zajištěna dostatečná míra přenositelnosti nástroje. Prostředí nabízí integraci cloudového úložiště Google Drive, což usnadňuje načítání veškerých vstupních dat. Nevýhodou tohoto nativního propojení je pomalejší zápis exportovaných tabulek s metrikami. Další zásadní výhodou pro zpracování této práce je podpora interaktivních prvků ve výstupech (tzv. widgetů), díky nimž bylo možné vytvořit uspokojivé přehledné grafické uživatelské rozhraní. Výsledný nástroj je tak možné používat a spouštět bez nutné znalosti programového kódu a koncový uživatel nemusí spatřit jediný řádek kódu.

#### 3.1.1 Použité knihovny

Vytvořený skript využívá sadu standardních i specializovaných softwarových knihoven jazyka Python. Základem pro manipulaci s daty a datovými typy jsou knihovny **Pandas** a **NumPy**. Ty jsou klíčové pro matematické operace s rekurentními maticemi (stěžejní pro tvorbu rekurentního grafu a výpočtu metrik celkově). Na ně logicky navazuje knihovna **SciPy** pro výpočet euklidovských vzdáleností z XY souřadnic jednotlivých fixací. **Scikit-learn** je blížek, který umožňuje standardizaci dat a následnou implementaci algoritmu neřízeného shlukování K-Means.

Veškeré grafické výstupy a interpretace umožňuje dvojice knihoven **Matplotlib** a **Seaborn**, pomocí nichž jsou generované veškeré boxploty, bodové grafy a jiné metody vizualizací. Zásadní prvkem pro ovladatelnost celého skriptu a jeho jednotlivých částí běžným uživatelem jsou knihovny **Ipywidgets** a **IPython**, jež nad samotným kódem tvoří, byť omezené grafické rozhraní (tlačítka pro spuštění, posuvníky, roletky pro výběr) přímo ve webovém prostředí prohlížeče. Celý skript je pak doplněn standardními systémovými balíky (os, math, re, google.colab.drive), které zajišťují bezproblémové propojení s cloudovým úložištěm, parsování textových řetězců a goniometrické výpočty.

#### 3.1.2 Princip částečného uživatelského prostředí

Aby skript vyšel vstříc i uživatelům neznalým jazyka Python, je skript navržený tak, aby nebylo třeba do samotných řádků kódu nahlížet. Prostřednictvím knihovny Ipywidgets a formátovacích značek prostředí Jupyter Notebook byl zdrojový kód v jednotlivých blocích kódu vizuálně ukryt a nahrazen interaktivními formulářovými prvky. Veškeré

nastavení nutná pro analýzu jsou buď již přednastavena, anebo probíhají pomocí částečného uživatelského prostředí.

Příkladné využití formátovacích značek Jupyter Notebook:

```
# @title Import knihoven { display-mode: "form" }
# @markdown Spustte tuto buňku pro import potřebných knihoven a nastavení Colab prostředí.
```

Tento styl cíleně snižuje náročnost replikovat, či navázat budoucím výzkumem na tuto práci a samotný skript. Kódu nechybí přímé komentáře, i když je fungování každé jedné buňky popsáno pomocí funkcí Jupyter Notebooku.

## 3.2 Průběh skriptu

Prostředí Google Colab umožňuje vkládat samotné buňky kódu, ale i buňky textu. Pro samotné spuštění jednotlivých buněk je nejdříve nutné celý skript připojit k běhovému prostředí. Pak je možné spustit celý kód najednou, či postupně po jednotlivých buňkách. Vzhledem k charakteru jednotlivých výstupů jednotlivých buněk je silně doporučeno spouštět buňky postupně chronologicky. Samotné spuštění buňky ve většině případů pouze připraví formulářový dialog, ve kterém je uživatel schopen spustit, či vizualizovat svou navolené části. Po spuštění jednotlivých buněk si paměť Colabu pamatuje její efekt na celkový skript, tudíž například není nutné před každou jednou buňkou znovu importovat knihovny z první buňky.

### 3.2.1 Nastavení cest k souborům

Úvodní blok kódu slouží k nezbytné konfiguraci prostředí, definování parametrů analýzy a nastavení cest k souborům. Prostřednictvím interaktivního formuláře Google Colab uživatel specifikuje cestu k pracovnímu adresáři na svém Google Drive a zadává názvy dvou povinných vstupních souborů: segmentovaných eye-trackingových dat ve formátu CSV a tabulky respondentů (obsahující jména a zařazení do skupin Nováček/Expert) (Obr. 7). Dále jsou zde definovány klíčové parametry pro následnou RQA analýzu,

Participant name	Experience_Group
Recording2	Expert
Recording3	Expert
Recording4	Expert
Recording5	Expert
Recording6	Expert
Recording7	Expert
Recording8	Nováček
Recording9	Nováček
Recording10	Nováček
Recording11	Nováček
Recording12	Nováček

Obr. 7: Vzorový formát tabulky respondentů s jejich úrovní zkušeností.

konkrétně minimální délky vertikálních a horizontálních linií pro výpočet DET a LAM (RQA\_L\_MIN a RQA\_V\_MIN). Skript na základě těchto vstupů automaticky sestaví absolutní cesty k souborům a definuje standardizované názvy pro budoucí výstupní CSV soubory. Klíčovou funkcí tohoto bloku je validace vstupů, kdy skript ověřuje fyzickou existenci zadaných dat na disku, čímž předchází chybám v pozdějších fázích zpracování. Závěrem jsou definovány globální barevné konstanty pro vizualizaci skupin respondentů v grafech.

### 3.2.2 Výběr stimulů a vyloučení nežádoucích respondentů

Po úspěšném definování cest ke vstupním souborům následuje fáze selekce a prvotního čištění dat. Tento krok je ve skriptu opět realizován pomocí interaktivního rozhraní (Obr. 8), jež dynamicky extrahuje seznam všech unikátních stimulů a zároveň i unikátní identifikátory respondentů přímo z nahraných segmentovaných dat. Zásadní funkcionalitou tohoto bloku kódu je však možnost manuálního vyloučení specifických participantů z dalších kroků analýzy. Zvolený výběr stimulů a vyřazených participantů je po potvrzení bezpečně uložen do globální paměti prostředí.

Pro potřeby analýzy dat určených pro bakalářskou práci byl využit tento blok kódu k selekci mapových výstupů z celého eye-tracking experimentu. Skript používá jednoduchou logiku a selektuje ze sloupce stimulus pouze záznamy se záznamem začínajícím na R. Dojde tak k odstranění irelevantních fixací v stimulech označených jako Eye-tracker calibration, Pauza1 atd. Zároveň byli pro konkrétní potřebu analýzy vyřazeni 2 participantů. Celkem tak do dalších kroků vstupoval dataset se sekvencemi fixací 73 participantů nad 50 stimuly.

#### Výběr stimulů a vyloučení nežádoucích respondentů

- V tomto kroku máte možnost upřesnit, jaká data vstoupí do analýzy. Po spuštění buňky:
  - V levém seznamu vyberte konkrétní stimuly (mapy), které chcete analyzovat.
  - V pravém seznamu můžete označit respondenty, které chcete z analýzy zcela vyřadit.
  - Výběr potvrďte kliknutím na tlačítko níže, čímž se data uloží pro další kroky.

[Zobrazit kód](#)

The screenshot shows a code cell with a selection interface. On the left, under the heading "Vyberte mapy k analýze:", there is a list of stimuli: R5aJV, R5aSV, R5bJV, R5bSV, R5cJV, R5cSV, R6aJV, R6aSV, and R6hJV. On the right, under the heading "Vyloučit tyto respondenty:", there is a list of recording IDs: Recording10, Recording11, Recording12, Recording13, Recording14, Recording15, Recording16, Recording17, and Recording18. Below the lists, there is a blue button labeled "Uložit výběr stimulů a partici...". A note at the bottom states: "(Naměřené fixace vybraných participantů budou smazány. Pro výběr více participantů držte CTRL.)"

Obr. 8: Výstup buňky kódu Výběr stimulů a vyloučení nežádoucích respondentů.

### 3.2.3 Sloučení dat a úprava AOI

Navazujícím a neméně důležitým krokem v postupu zpracování dat je sjednocení a pojmenování AOI. Z důvodu často nekonzistentního nebo technicky orientovaného pojmenování zón v exportech ze samotného experimentu (např. překrývající se vícenásobné zóny jako „01;All“) skript nejprve provádí extrakci všech unikátních

nalezených AOI. Výzkumníkovi je následně v interaktivním rozhraní umožněno tyto nepřehledné názvy transformovat do standardizovaných jím navolených nových AOI a zařadit je do příslušných kategorií (Mapové pole, Legenda, Ostatní) (Tabulka 1). Toto exaktní sjednocení je naprosto nezbytným předpokladem pro budoucí výpočet AOI přístupu RQA, jejíž matice je závislá na přesné shodě navštívených oblastí. Vedle sjednocení AOI algoritmus rovněž automaticky parsuje názvy stimulů a dedukuje z nich cílové (dotazované) intervaly úlohy.

Ve finální fázi tohoto kroku skript anonymizuje unikátní identifikátory participantů (např. Recording11 Frantisek → Recording11) a provádí vnitřní spojení (inner join) eye-trackingových dat s externí tabulkou zkušeností. Výsledkem této operace je pročištěná, plně sjednocená datová sada, ve které je každé jednotlivé fixaci exaktně přiřazena správná oblast zájmu, úroveň zkušenosti respondenta i informace o konkrétním úkolu. Skript celou datovou sadu uloží do formátu .csv s přednastaveným pojmenováním SegmentedData-SingleAOI.csv. Tento soubor následně slouží jako robustní základ pro veškeré další výpočty.

Tabulka 1: Úprava AOI

<b>Původní AOI</b>	<b>Samostatné AOI</b>	<b>Kategorizované AOI</b>
All	Others	Mapa (0)
01;All	1	Legenda (1)
02;All	2	Legenda (1)
03;All	3	Legenda (1)
04;All	4	Legenda (1)
05;All	5	Legenda (1)
06;All	6	Legenda (1)
07;All	7	Legenda (1)
08;All	8	Legenda (1)
09;All	9	Legenda (1)
01;02;All	1	Legenda (1)
02;03;All	2	Legenda (1)
03;04;All	3	Legenda (1)
04;05;All	4	Legenda (1)
05;06;All	5	Legenda (1)
06;07;All	6	Legenda (1)
07;08;All	7	Legenda (1)
08;09;All	8	Legenda (1)
All;Title	Title	Ostatní (2)
All;Imprint	Imprint	Ostatní (2)
All;Brightest	Brightest	Mapa (0)
All;Darkest	Darkest	Mapa (0)
All;Target	Target	Mapa (0)

All;target	Target	Mapa (0)
All;Brightest;Target	Target	Mapa (0)
All;Darkest;Target	Target	Mapa (0)
All;Darkest;target	Target	Mapa (0)

### 3.2.4 Filtrace odlehlých hodnot

Jedním z posledních kroků před samotným výpočtem metrik RQA je zajištění čistoty dat z hlediska odlehlých hodnot (outlierů). V kontextu této práce byly outliers posuzovány na základě počtu fixací, nikoliv na hodnotách samotných metrik. Jedná se tedy o měření, kde respondent stimul (mapu) prohlížel extrémně dlouho (vysoký počet fixací), či neúměrně krátkou dobu (nízký počet fixací). Tyto vysoké či nízké počty mohou být způsobeny ztrátou pozornosti účastníka, či naopak odevzdanost při plnění úkolu daného experimentu, která způsobuje hádání namísto racionálního zkoumání stimulu a následné rozhodování.

Za tímto účelem skript implementuje statistickou metodu mezikvartilového rozpětí (IQR). Je na místě zdůraznit, že algoritmus nepočítá hranice kvartilů v celém datasetu globálně, nýbrž konkrétně pro každý stimul zvlášť. Bylo tím tak ošetřeno a bráno v potaz, že leckterý stimul (mapa) může být pro účastníka složitější, tím pádem bude provedeno více fixací. Tato vlastnost stimulu není algoritmem tedy brána jak odlehlá hodnota. Souběžně s horní a dolní hodnotou kvartilovou hranicí skript hlídá i podmínku pro matematické minimum k vytvoření sekvencí fixací vykazující DET a LAM. Tato hodnota je dynamicky počítána z minimální délky diagonální, horizontální a vertikální sekvence pro výpočet metriky v druhé buňce kódu (Nastavení cest k souborům). Čili pokud se minimální délka sekvence rovná 2, minimální počet fixací pro 1 měření musí být 3. Měření, která nevyhovují zmíněným podmínkám jsou z datasetu odstraněna a skript vytvoří nový soubor s definovaným pojmenováním SegmentedData-complete.csv.

### 3.2.5 Výpočet rádiusu pro XY přístup

Pro realizaci XY varianty výpočtu rekurentních fixací bylo důležité exaktně stanovit prahovou vzdálenost (rádius), v jehož rámci jsou dvě fixace posouzené jako rekurentní. Namísto expertního odhadu, či převzaté hodnoty rádiusu tento skript implementuje buňku kódu, kde je možné optimální vzdálenost vypočítat na základě stanovených parametrů.

Skript, prostřednictvím rozhraní shromažďuje fyzické parametry uspořádání experimentu: rozlišení monitoru v pixelech ( $x$ ,  $y$ ), úhlopříčka monitoru v palcích ( $d$ ), průměrnou pozorovací vzdálenost očí respondenta od obrazovky v centimetrech ( $D$ ) a uvažovanou velikost zorného úhlu fovey ( $\alpha$ ). Samotný výpočet je realizován v následujících čtyřech krocích:

Nejprve algoritmus určí hustotu obrazových bodů displeje (PPI – Pixels Per Inch) pomocí Pythagorovy věty aplikované na rozlišení monitoru:

$$PPI = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d}$$

Z této hodnoty je následně odvozena fyzická velikost jednoho pixelu v centimetrech ( $S_{px}$ ), přičemž se vychází ze standardního převodního vztahu (1 palec = 2,54 cm):

$$S_{px} = \frac{2,54}{PPI}$$

Ve třetím kroku skript vypočítá reálný fyzický poloměr foveálního průmětu na povrchu monitoru v centimetrech ( $R_{cm}$ ). K tomu je využita goniometrická funkce tangens pracující s polovinou zorného úhlu a průměrnou pozorovací vzdáleností:

$$R_{cm} = D \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

V závěrečném kroku je fyzická velikost poloměru převedena zpět do pixelové soustavy vydělením velikostí jednoho pixelu, čímž vzniká finální prahová hodnota ( $R_{px}$ ) vyjadřující maximální tolerovanou vzdálenost fixací pro RQA využívající XY přístup:

$$R_{px} = \frac{R_{cm}}{S_{px}}$$

Výsledná prahová hodnota ( $R_{px}$ ) je automaticky uložena do globální paměti běhového prostředí. Tento postup zaručuje, že následná prostorová RQA analýza respektuje reálné biologické kapacity lidského zraku (typicky 1,5° až 2° foveálního vidění) i technická specifiká použitého hardwaru. Pro potřeby bakalářské práce byl rádius vypočítán a stanoven na 50 px, což odpovídá hodnotám zmíněných odbornou literaturou (Anderson et al. 2023).

### 3.2.6 Výpočet RQA metrik

Skript autonomně provádí výpočet metrik na základě dvou zmíněných přístupů (AOI a XY) zároveň. V rámci AOI větve skript prochází sekvence fixací (1 sekvence = fixace 1 participanta na 1 stimulu) a konstruuje binární matici návratů (rekurencí) na základě textové shodě pojmenovaných AOI. XY větve konstruuje stejnou matici na základě euklidovské vzdálenosti vypočítané z x,y souřadnic jednotlivých fixací. Fixace jsou tedy označeny jako rekurentní pouze tehdy když jsou od sebe vzdálené méně než rádius stanovený v předchozím kroku. Skript automaticky přebírá vypočtenou hodnotu a pokud uživatel předchozí buňku ještě nespustil, je možné nastavit rádius ještě dodatečně. Z těchto vytvořených matic skript extrahuje všechny tři stěžejní metriky s vyřazením hlavní diagonály.

Výsledkem celého výpočetního procesu jsou dva separátní soubory s výsledky (Tabulka 2): rqa\_results\_XY.csv a rqa\_results\_AOI.csv. Každý soubor obsahuje vypočítané metriky pro každou kombinaci stimul a respondent.

Tabulka 2: Ukázka výsledků (pro úhledné formátování uvedeno pouze 5 desetinných míst)

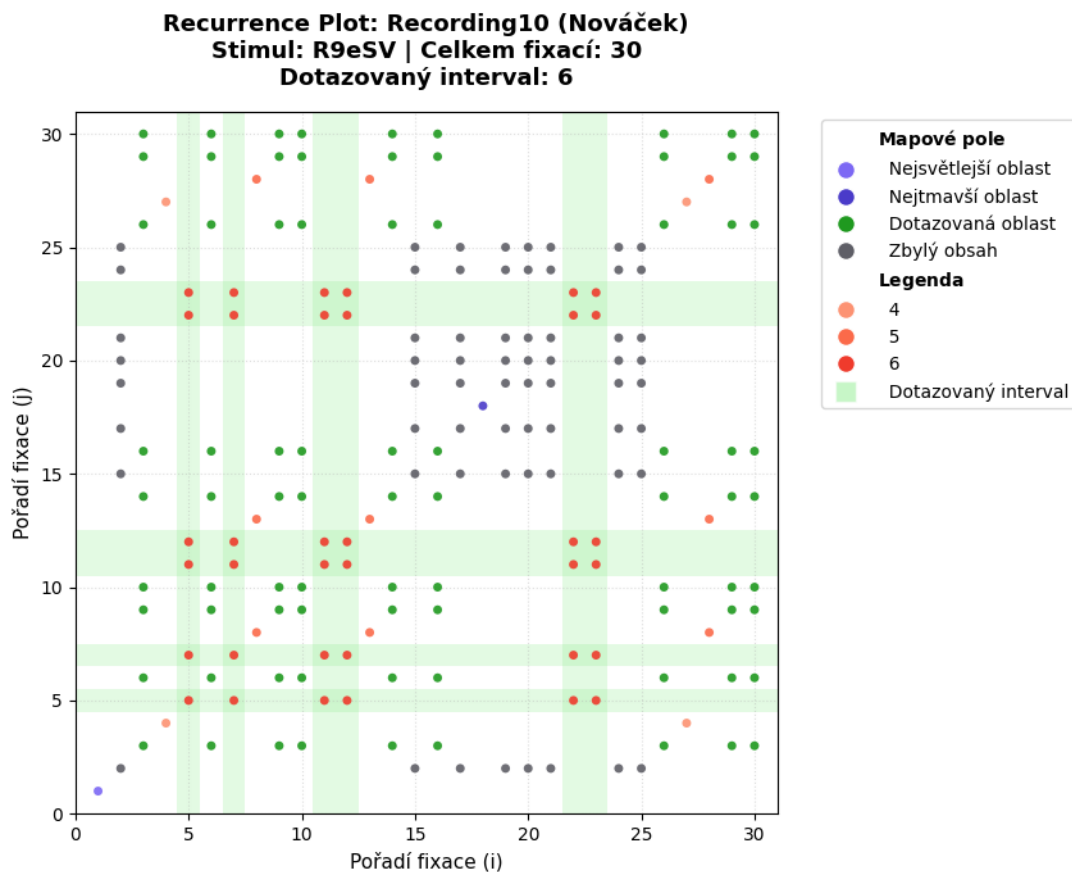
participant	stimulus	Zkusenosti	RR	DET	LAM
Recording10	R5aJV	Nováček	0.19047	0.00000	0.00000
Recording10	R5aSV	Nováček	0.19230	0.13333	0.43333
Recording10	R5bJV	Nováček	0.15384	0.16666	0.33333
Recording10	R5bSV	Nováček	0.12727	0.28571	0.42857
Recording10	R5cJV	Nováček	0.25000	0.33333	0.55555
Recording10	R5cSV	Nováček	0.19444	0.28571	0.28571
Recording10	R6aJV	Nováček	0.14666	0.34090	0.34090
Recording10	R6aSV	Nováček	0.24637	0.45588	0.49264

### 3.2.7 Vizualizace

Tento blok slouží jako hlavní interaktivní vizualizační panel, jehož úkolem je transformovat surová numerická data (exportovaná v předchozím kroku) do srozumitelných grafických výstupů. Rozhraní (Obr. 9) umožňuje dynamicky přepínat mezi výsledky AOI a XY přístupu a nabízí výzkumníkovi komplexní zhodnocení kognitivních strategií prostřednictvím čtyř logicky oddělených záložek.

Obr. 9: Rozhraní se záložkami pro jednotlivé vizualizace.

První z nich, Recurrence plot (Obr. 10), je určen pro detailní kvalitativní analýzu jednotlivce. Jedná se o čtvercovou matici, která chronologicky vizualizuje fixace v čase. Barevné označení jednotlivých bodů je převzato z reálných barev jednotlivých odstínů legendy a plošné zvýraznění dotazovaného intervalu umožňuje exaktně trasovat postup řešení úlohy – lze tak vizuálně identifikovat okamžiky, kdy se čtenář vracel pro ověření informací, nebo naopak fáze systematického čtení.



Obr. 10: Recurrence plot.

Druhá záložka, Boxplot, přechází od jednotlivců ke statistickému zhodnocení celých skupin (např. porovnání expertů a nováčků). Pomocí krabicových grafů přehledně vizualizuje kvantitativní rozdělení hodnot všech tří RQA metrik (RR, DET, LAM) včetně vyznačení přesných mediánů, což usnadňuje identifikaci obecných trendů v datech.

Třetí pohled poskytuje Scatter plot (bodový graf), který zkoumá vzájemný vztah metrik a odkrývá tak celkovou typologii vizuálních strategií. Umístěním Determinismu na osu X a Laminarity na osu Y graf ukazuje, zda respondent (či skupina) volil spíše systematický průzkum mapy, nebo intenzivní lokální dekodování. Komplexnost pohledu je doplněna mapováním třetí metriky (Recurrence Rate) na velikost samotného bodu.

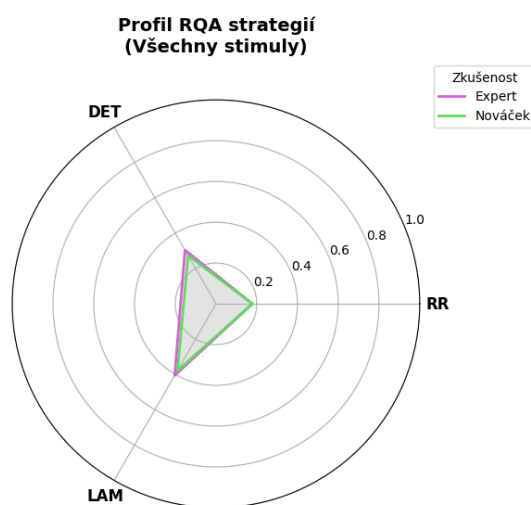
Poslední záložka nabízí Radar plot (pavučinový graf), jenž slouží k holistickému zobrazení průměrného kognitivního profilu. Sloučením všech tří metrik do jediného polygonu umožňuje okamžité a vysoce intuitivní vizuální srovnání celkového přístupu k mapové úloze mezi rozdílnými zkušenostními skupinami.

## 4 VÝSLEDKY SCÉNÁŘŮ

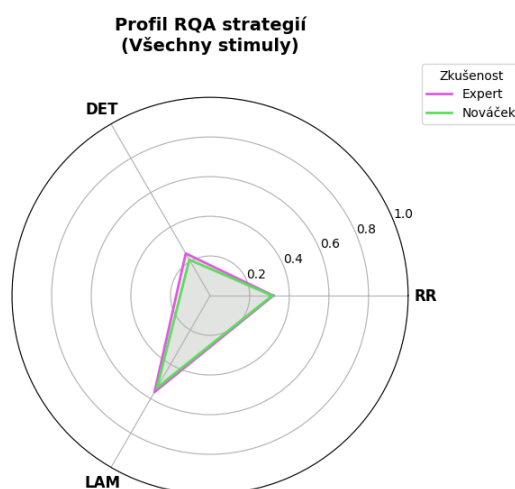
V této kapitole budou prezentovány výsledky jednotlivých určených scénářů, získaných pomocí vyvinutého skriptu.

### 4.1 Scénář 1

Prvním scénářem byly zhodnocené celkové profily zkušených a nezkušených participantů. Původním předpokladem bylo, že kartografičtí experti budou díky svým předchozím zkušenostem s prací s mapou vykazovat efektivnější vzorce čtení mapy. Jak ovšem ukazuje pomocí průměrných hodnot pavučinový graf (Obr. 11, Obr. 12), vizuální strategie expertů a nováčků se překvapivě z hlediska metrik téměř neliší. Tvary obou RQA profilů v obou přístupech (AOI i XY) jsou takřka identické. Tento poznatek naznačuje, že obě skupiny přistupovaly ke čtení map obdobným způsobem, který není závislý na míře jejich zkušenosti.

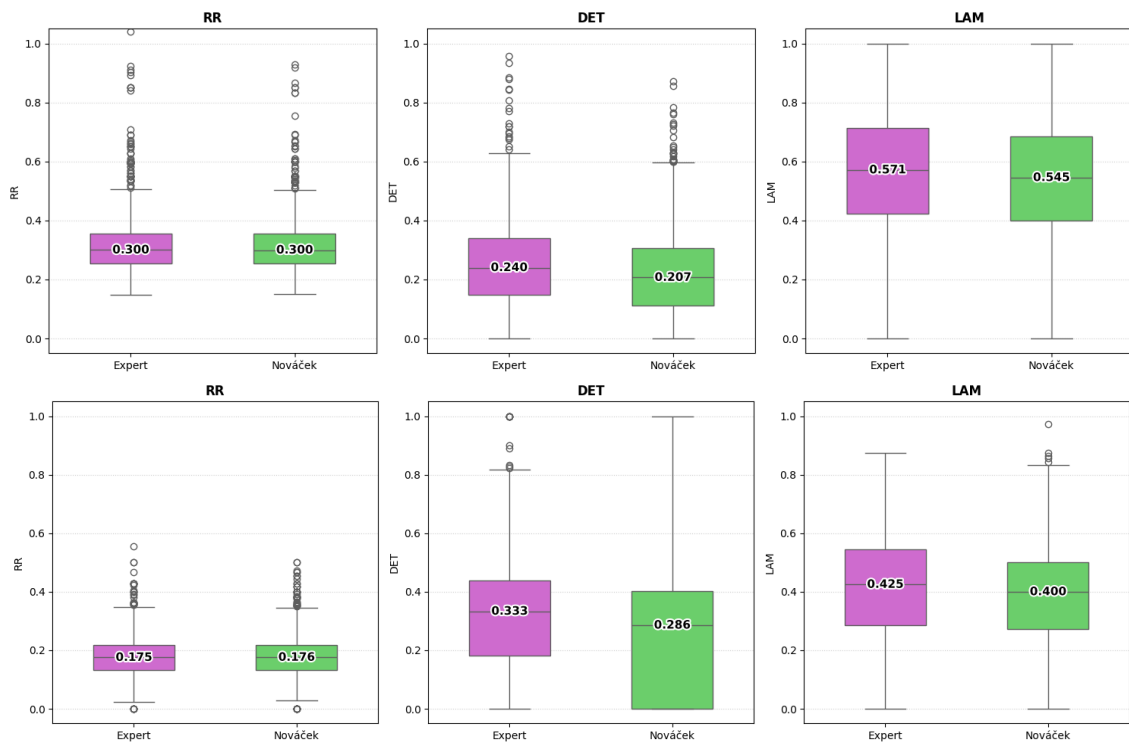


Obr. 11: Radar chart (pavučinový graf) srovnání nováčků a expertů, XY přístup.



Obr. 12: Radar chart (pavučinový graf) srovnání nováčků a expertů, AOI přístup.

Tuto úvahu potvrzují i boxploty (Obr. 13). Hodnoty u všech tři sledovaných metrik vykazují minimální nevýznamné odchylky. Z analytického hlediska je toto zjištění vysoce hodnotné. Prokazuje totiž, že samotná úroveň předchozí kartografické expertízy v tomto konkrétním experimentu nedokázala změnit způsob, jakým lidé stimuly vizuálně prohledávali. Cenným zjištěním je rozdíl výsledků mezi samotnými přístupy k RQA. Metriky stanovené pomocí AOI přístupu jsou vyšší. To se dá vysvětlit velikostí stanovených AOI, kde je pro fixace snazší být rekurentní. Tento fenomén se prolíná všemi scénáři. Stimuly (zejména jejich legendy) byly pravděpodobně strukturovány takovým způsobem, že si striktně vynutily jeden specifický „algoritmus“ čtení, který nedával prostor pro uplatnění expertních zkratk a zkušenosti kartografové tak museli mapu louskat bod po bodu úplně stejně jako naprostí laici. Samotné strategie se tedy liší spíše individuálním přístupem než definovaným zkušenostmi.

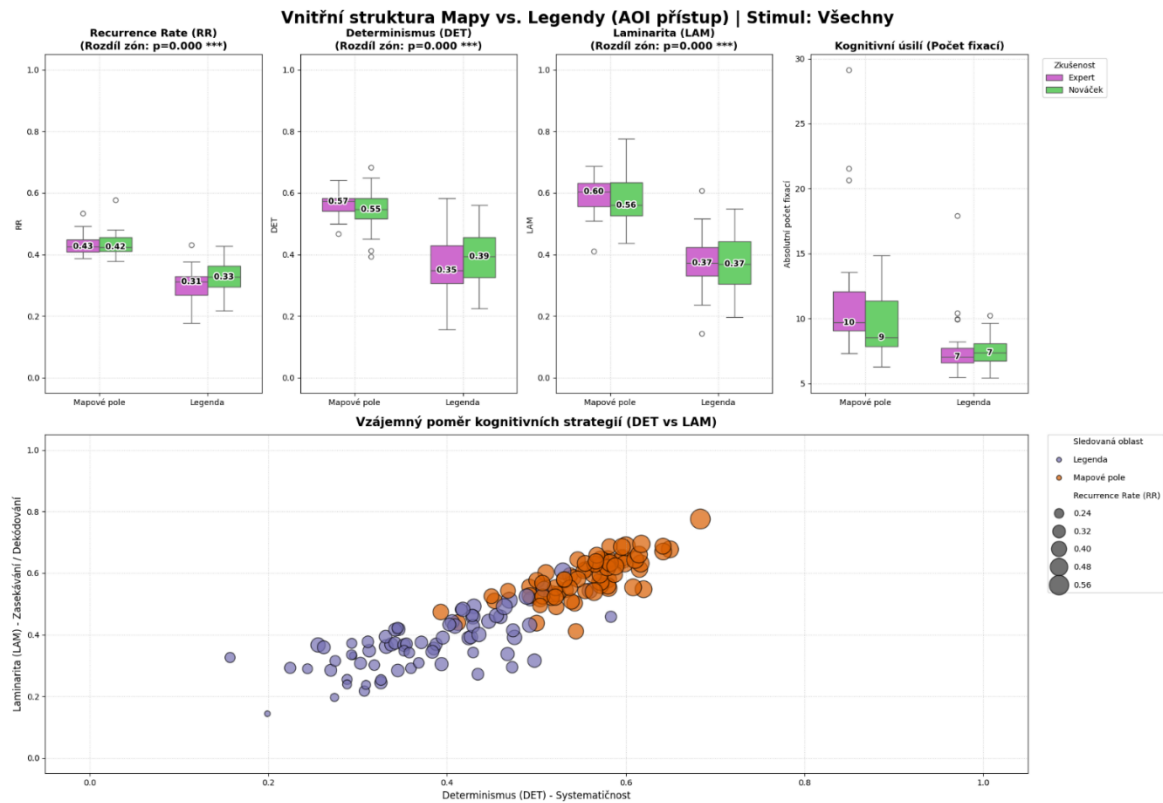


Obr. 13: Srovnání metrik skupin Expert Nováček (AOI přístup nahoře, XY dole).

## 4.2 Scénář 2

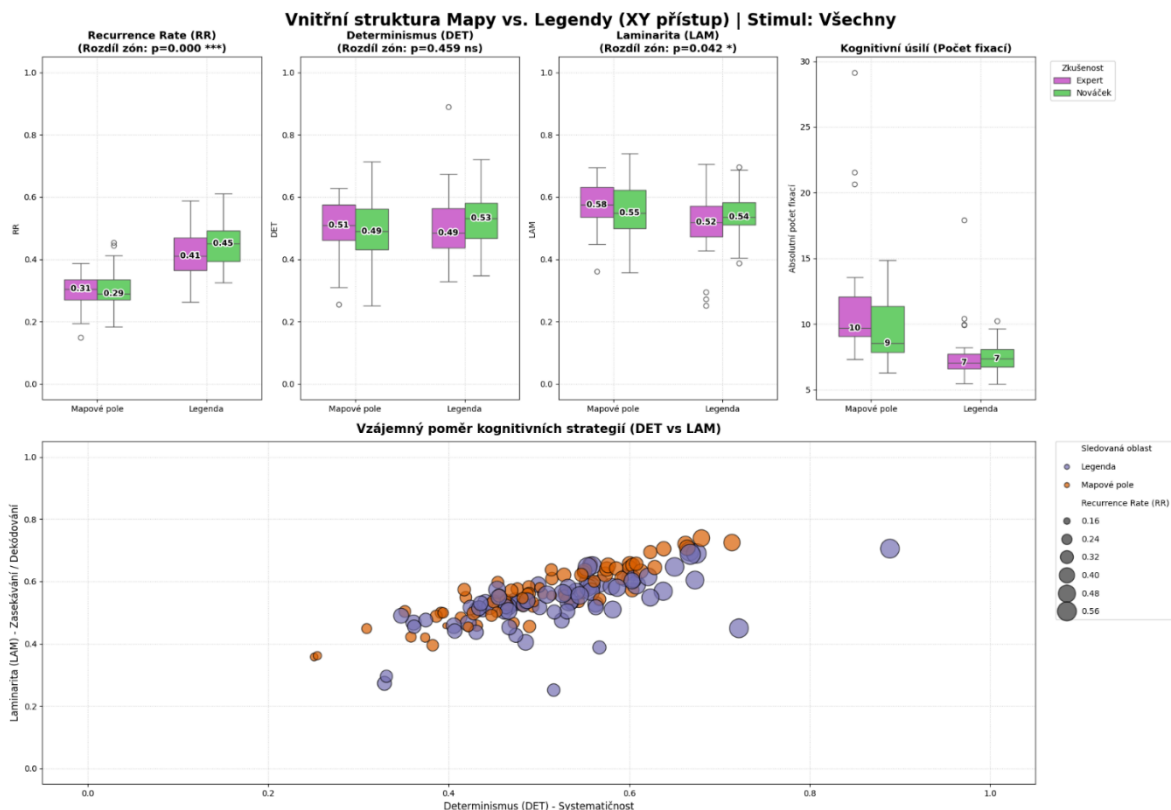
Ve druhém analytickém scénáři byla pozornost přesunuta od globálních profilů respondentů k detailnímu zkoumání vnitřní struktury samotného stimulu. Cílem bylo zjistit, zda participanti mění své strategie při skenování odlišných kompozičních prvků mapy (konkrétně legendy a mapového pole). Pro toto srovnání byly využity subsekvence fixací v AOI legendy a mapového pole zvlášť.

Srovnání metrik na základě oblasti se liší výrazně v obou scénářích. AOI přístup (Obr. 14) ukazuje výrazně vyšší metriky v mapovém poli než v legendě. Kdežto XY přístup ukazuje obdobné hodnoty metrik obou oblastí. Tento rozdíl je opět způsobený definicí jednotlivých AOI, což je v mapovém poli dost obtížné objektivně provést.



Obr. 14: Srovnání metrik oblastí vnitřních oblastí stimulu (AOI přístup)

Naopak XY přístup (Obr. 15) přináší významný rozdíl pouze v míře rekurence, kde subsekvence fixací legendy mají hodnotu vyšší než subsekvence mapového pole. Tento významný rozdíl mezi oběma přístupy vykresluje nejednoznačnost správného přístupu. Vyšší hodnoty metrik v mapovém poli u AOI přístupu mohou značit právě problémovost velkých AOI uvnitř mapového pole a celkově jejich určení v tomto nehomogenním poli. Kdežto vyšší míra rekurence u XY přístupu může být zapříčiněna naopak celkově menší velikostí této oblasti. Stanovený rádius 50 pixelů se tak v obrovském mapovém poli (v porovnání s onou legendou) jeví jako malá oblast, kdežto v legendě jsou automaticky fixace blíže k sobě, a tudíž je tato metrika zvýšená.



Obr. 15: Srovnání metrik oblastí vnitřních oblastí stimulu (XY přístup)

### 4.3 Scénář 3

Tento scénář je způsobem odlišný od dvou přechozích. Místo na získání metrik za celou dobu plnění úkolu participantem se zaměřuje na průběh celého měření, a tudíž se předpokládá, že zaznamená náhle změny ve strategii, či postupu jednotlivého respondenta. K takto detailnímu provedení RQA byl využit Worm plot, který zobrazuje postupný vývoj metriky s nabývajícím počtem fixací. Díky podbarvení grafu na základě jednotlivých AOI je možné trasovat, jak konkrétně každý participant postupoval. Charakter samotného Worm Plotu ve spojení s Recurrence plotem umožňuje provádět kvalitativní explorativní analýzu.

Pro pochopení detailního postupu participanta pomocí RRQA byl vybrán případný stimul R9gSV, jakožto stimul s nejsložitější legendou. Úkolem respondenta bylo určit odstín (interval) legendy, který se nachází uvnitř AOI Target stejně jako u všech ostatních stimulů. Korektní odpovědí byl interval 8. K analýze byla využita kombinace Worm Plot + Recurrence Plot (Obr. 16, Obr. 17).

Z grafů lze rozdělit celý proces řešení úlohy do tří částí:

#### Prvotní orientace a lokalizace cíle

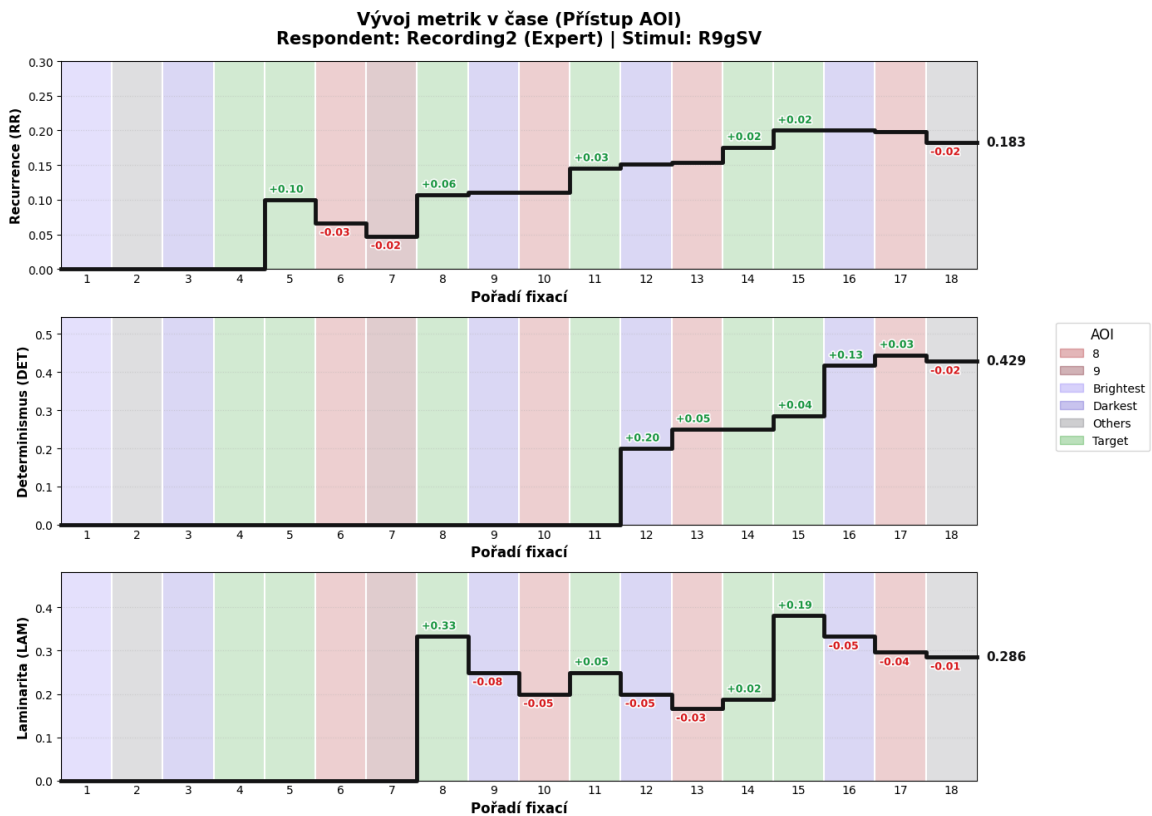
V prvních pěti fixacích stimulu (mapu) teprve „osahává“. Startuje fixací mapového pole v nejsvětlejší a nejtmaší části a nimi ještě obrovské AOI All (po reklasifikaci Others), což je ostatní plocha mapového pole. Fixace 4 a 5 je již věnována úkolovému AOI přibližně šipkou. V této fázi fixace participanta negenerují žádné hodnoty metrik. Na této fázi je dokázáno, že přestože se nezvedá hodnota DET jakožto ukazatel systematickosti, tak participant nějaký systém měl (nejtmavší a nejsvětlejší oblast).

### První interakce s legendou

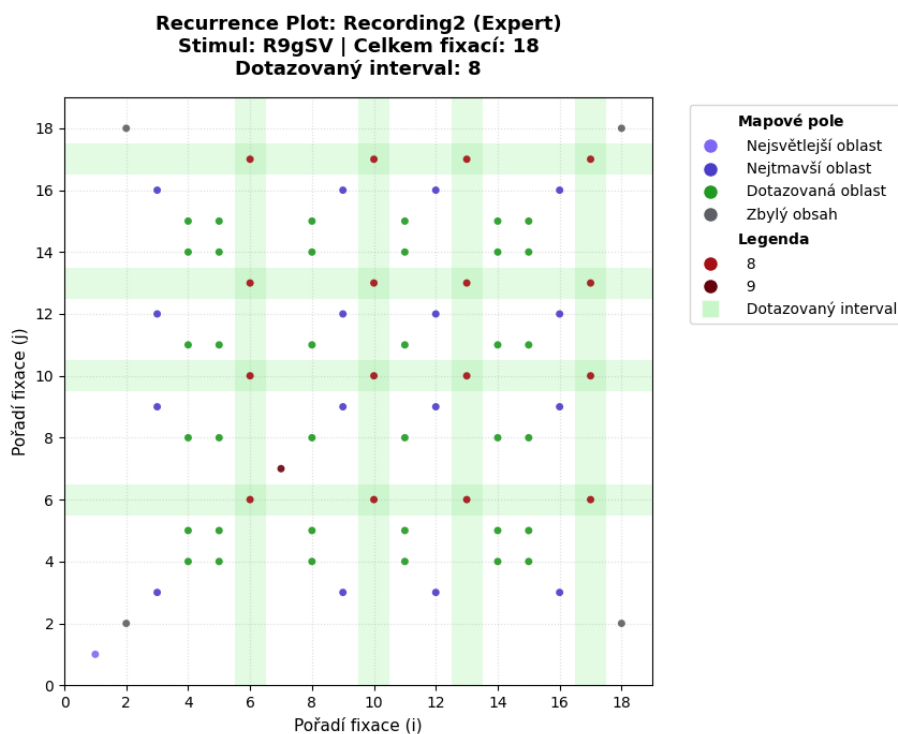
S šestou fixací poprvé participant zavítá pohledem opustí mapové pole a vstupuje do legendy, konkrétně přímo na správný interval 8 a následně na vedlejší interval 9. Klíčový moment nastává u fixace č. 8 a 9, kdy se zrak vrací zpět do dotazované oblasti (Target). V tomto okamžiku na grafu Running RQA prudce skokově roste LAM (skok o +0.33). Tento masivní nárůst lokálního zasekávání indikuje proces repetice: respondent porovnává odstín, který právě viděl v legendě, s odstínem v mapě. Následně se pro ujištění vrací zpět do legendy na interval č. 8 (fixace 10).

### Fáze ověření

Třetí fáze je z metodologického hlediska nejzajímavější a prokazuje osobní chování participanta. Ačkoliv pravděpodobně již u fixace 10 znal správnou odpověď, úlohu neukončil. Místo toho začal svoje dosavadní počínání verifikovat. Jak odhaluje Recurrence Plot, respondent začal ve smyčce střídát tři konkrétní oblasti: Dotazovanou oblast → Nejsvětlejší oblast na mapě → Správný interval legendy (8). Tuto smyčku (kdy si expert pravděpodobně pomáhal nejsvětlejší barvou v mapě jako referenčním bodem) zopakoval hned několikrát za sebou. Matematickým důkazem této systematické smyčky je křivka DET v Running RQA. Ta byla až do fixace 10 absolutně nulová, ale od fixace 11 začíná tvořit výrazné „schody“ (skoky o +0.20 a +0.13), až se vyšplhá na finální hodnotu 0.429.



Obr. 16: Worm Plot metrik, Stimul R9gSV, Participant Recording2.



Obr. 17: Recurrence plot, Stimul R9gSV, Participant Recording2.

### 4.3.1 Srovnání napříč participanty a stimuly

Kvalitativní srovnání výsledků RRQA pro více participantů zároveň bylo realizováno pomocí specifických Heatmap strip grafů (Obr. 18), které pod sebe srovnávají křivku vývoje dané metriky jakožto buňky s různou intenzitou barvy dle hodnoty metriky. Specifický vývoj metriky ukazuje vzorce, kterými participant řešil úkol a interagoval se stimulem.

#### Vývoj determinismu

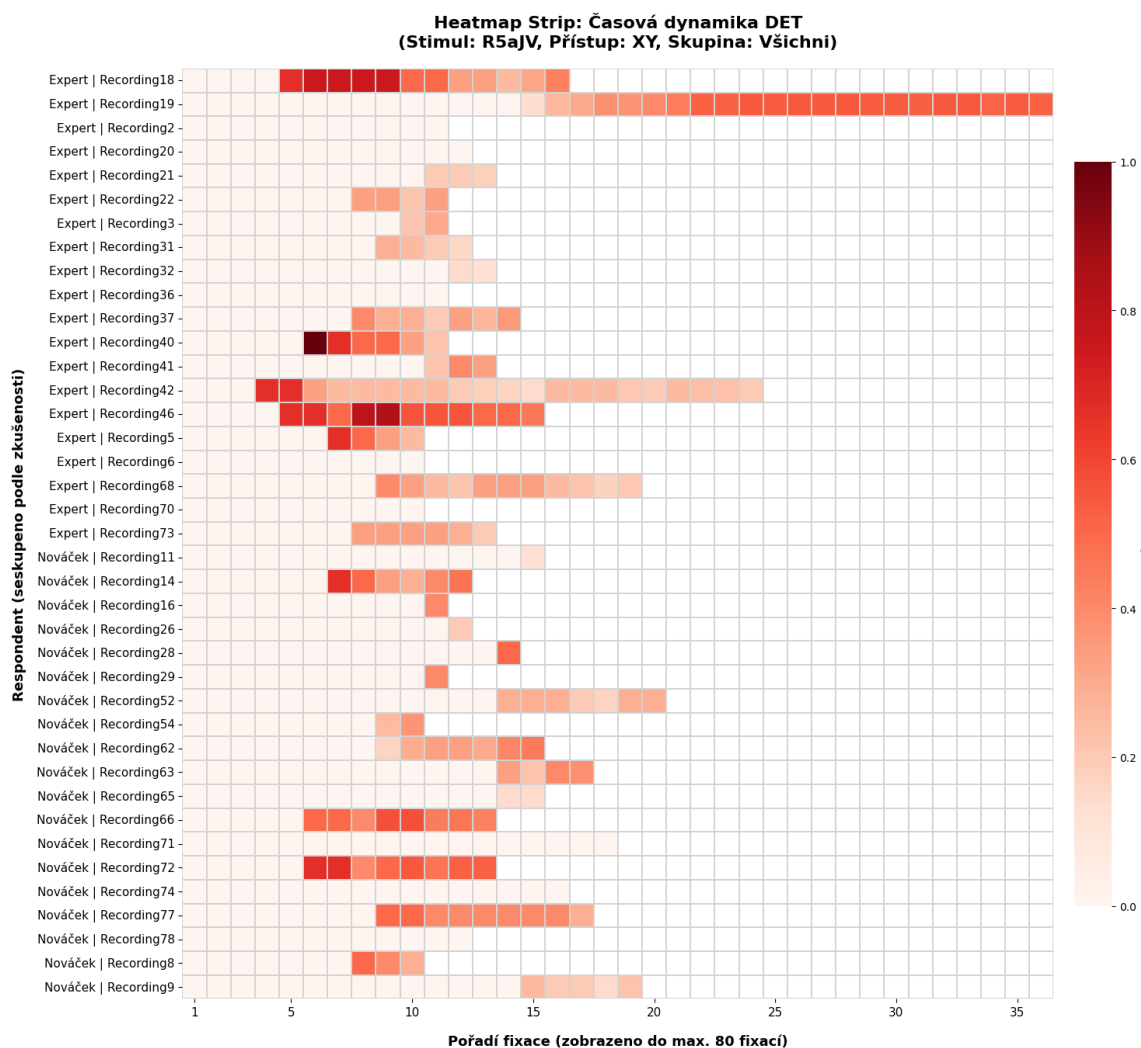
Determinismus, obecně jako indikátor systematického postupu participanta, může mít koncovou hodnotu po poslední provedené fixaci stejnou, ovšem postup, kterým se participantovi fixace k této hodnotě dostanou může značit odlišné chování.

Strmý nárůst DET s následným ustálením (Obr. 18, participant Recording46), či mírným poklesem může značit v postupu participanta jistý aha-moment, kdy opustil úvodní fázi seznámení se stimulem (mapou) a začal aplikovat svůj zvolený systém řešení úkolu. Naopak velmi pozvolný lineárně vypadající nárůst DET (Obr. 18, participant Recording19) značí, že systematickost vyjádřená touto metrikou přišla v procesu čtení spíše nahodile a vlivem například delší sekvence než samotným rozhodnutím participanta jednat strategicky. Participant s velmi nízkou hodnotou DET v průběhu celé sekvence (Obr. 18, participant Recording20) pro vyřešení úkolu nepotřebovali systematické čtení, například z důvodu málo obtížného zadání úkolu, či velmi rychlého řešení.

#### Vývoj laminarity

Laminarita v kontextu očních pohybů znamená, zdržení pohledu na delší dobu ve stejné oblasti. Indikuje tedy pozastavení na jednom místě, což může být zapříčiněné složitým detailem, který si vyžaduje delší pozornost.

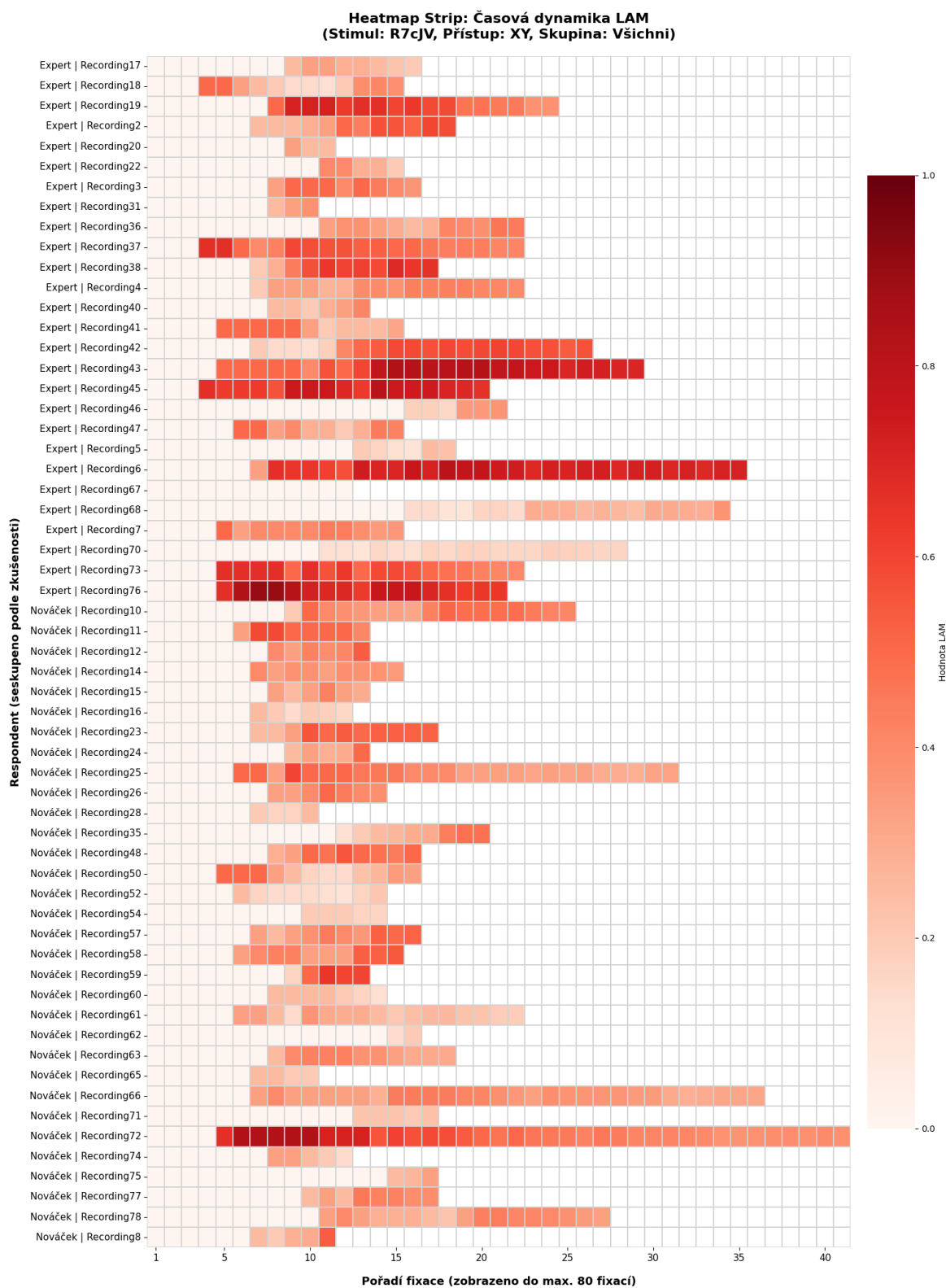
Skoky nárůstu LAM (Obr. 19, participant Recording18) v časové sekvenci značí, že participant v průběhu řešení úkolu narážel na místa, která vyžadovali jeho souvislejší pozornost. Typicky to značí, že místo ve stimulu již fixované jednou se po určitém čase projevilo jako důležité k reinspekci a naopak. Obdobně jako u determinismu mohou dvě stejné finální hodnoty metriky představovat odlišný vývoj. Neustálá vysoká hodnota LAM (Obr. 19, participant Recording6) značí, že participant postupuje rozvážněji a na každém místě setrvává déle než jednu fixaci.



Obr. 18: Heatmap strip, DET, Stimul R5aJV, XY přístup

Vývoj metrik byl následně vizualizován i pro všechny testované stimuly jednoho participanta, což opět ukázalo, že jednání není podmíněné jeho zkušeností, ale spíše momentálním rozhodnutím v průběhu experimentu. Nováčky i experti tak voji strategii upravují „on the fly“ a v tomto typu experimentu spíše improvizují při každém stimulu. Co však RRQA vizualizovaná pomocí Heatmap strip ukázala prostřednictvím DET, je podobný vzorec řešení participanta napříč všemi stimuly. U participanta, který je dle zkušeností nováček (Obr. 20), lze sledovat, že první fáze prozkoumání stimulu trvá běžně až 7 fixací a determinismus začne stoupat až posléze. Avšak jakmile nějakou subsekvenci fixací zopakuje tak jeho řešení úkolu ukončí. To může značit, že jakmile

jednou verifikuje svoji prvotní prohlídku, již nepotřebuje více fixací, aby splnil otázku experimentu.



Obr. 19: Heatmap strip, LAM, stimul R7cJV, XY přístup



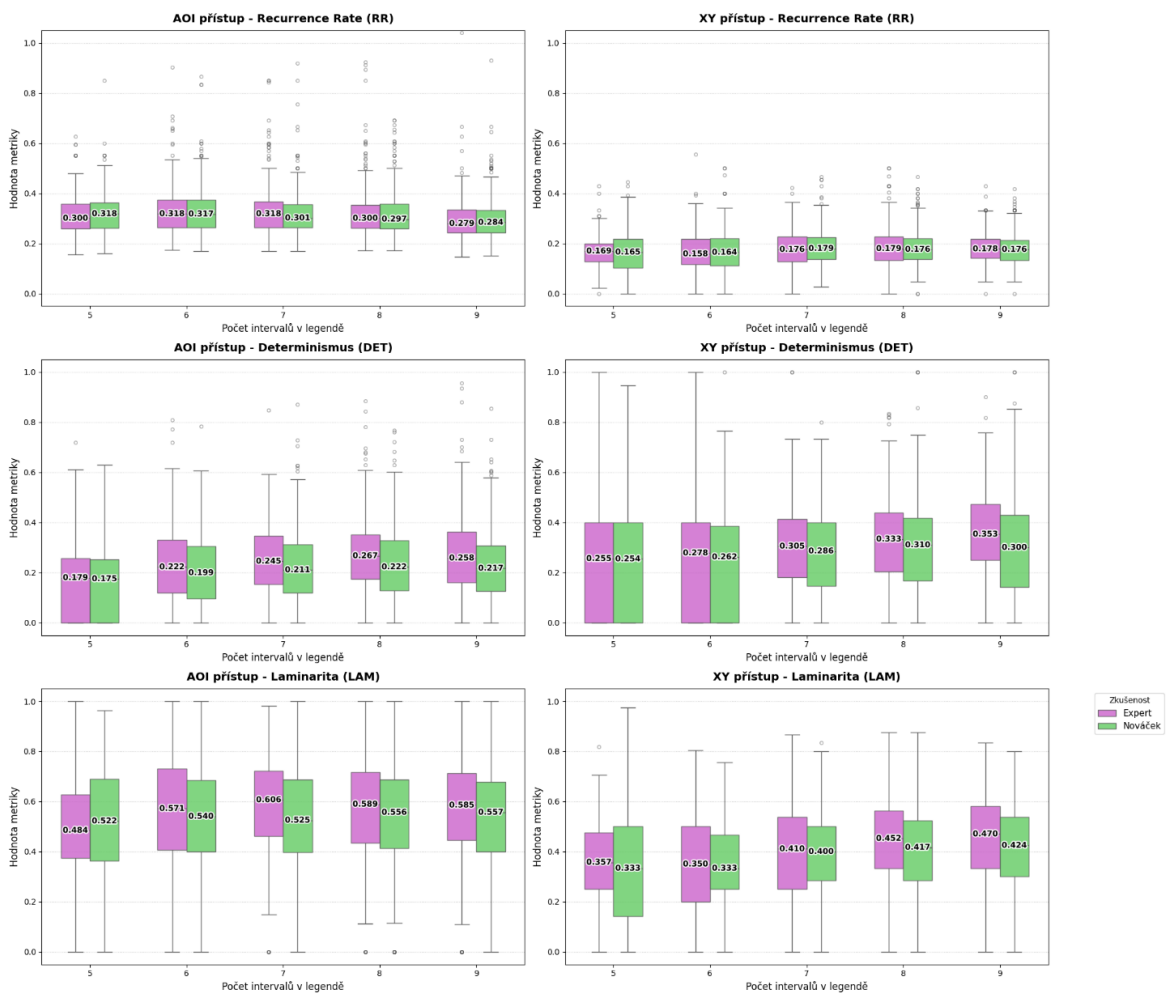
## 4.4 Doplnující scénáře

### 4.4.1 Doplnující scénář 1

V rámci doplňujícího scénáře 1 byl zkoumán vliv složitosti stimulu v podobě více intervalů legendy na výsledné metriky. Cílem bylo tedy kvantifikovat, zda se strategie typická pro jednotlivé metriky mění s přibývajícím počtem intervalů legendy. Scénář byl prováděn na celých sekvencích fixací provedených nad stimulem. K vizualizaci distribuce dat byly využity krabicové grafy (boxploty), které umožňují sledovat nejen vývoj mediánů, ale především rozptyl hodnot uvnitř skupiny (Obr. 21).

Při pohledu na grafy RR je patrné, že míra rekurence je napříč všemi legendami stabilní a významně se neliší napříč různě složitými legendami. Druhý řádek grafů, znázorňujících DET jistě rozdíly ukazuje. S přibývajícím počtem intervalů se zvyšuje medián DET. Nováčci mají v obou přístupech nižší medián DET, což může značit, že jejich postup nebyl tak systematický. Rozdíl mezi mediánem expertů a nováčků se také prohlubuje s přibývajícím počtem stimulů, což může vypovídat o tom, že rozdíl v metrikách mezi experty a nováčky se projeví až při náročnějším úkolu nebo na přílišně komplikovaném stimulu. 5-ti intervalové stupnice mají v obou přístupech výrazný

Vliv složitosti legendy (počtu intervalů) na RQA metriky  
Srovnání AOI přístupu a XY přístupu



Obr. 21: Vliv počtu intervalů legendy na metriky RQA (AOI i XY přístup)

rozptyl a někteří participantů ve svých fixacích žádný DET nezaznamenali. Tento poznatek naznačuje, že pro provedení deterministických sekvencí je zapotřebí náročnějších úkolů v experimentu.

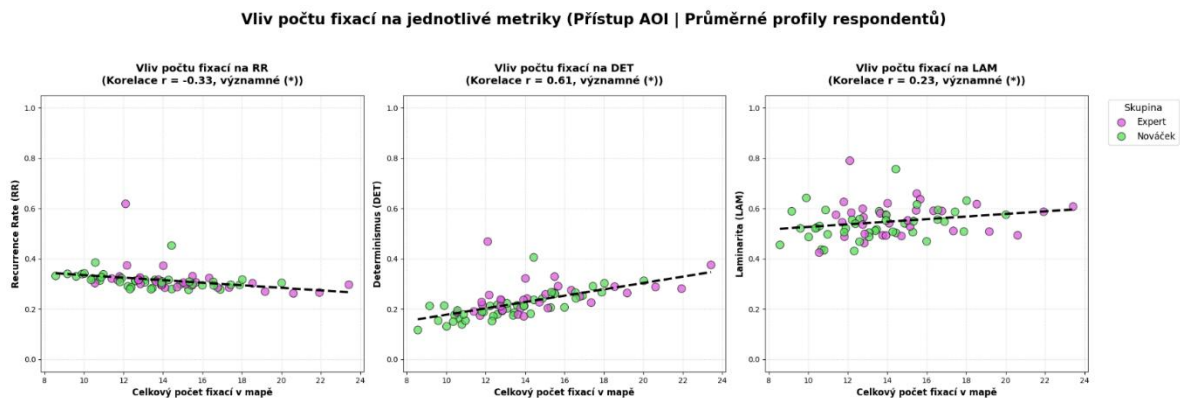
V třetím řádků grafů, znázorňujících LAM lze sledovat, že metrika opět s přibývajícím počtem intervalů v legendě stoupá. To může značit jistou nejistotu a nutnost se navracet na již fixovaná místa v mapě. Toto chování může být způsobeno touhou participantů odpovědět za každou cenu správně i za cenu podrobnějšího zkoumání.

#### 4.4.2 Doplnující scénář 2

Výsledky korelační analýzy vizualizované pomocí bodových grafů (Obr. 22, Obr. 23), kde jeden bod = jeden průměrný profil participanta za všechny stimuly, odhalují specifické chování metrik při rostoucí délce sekvence fixací. Původní předpoklad růstu RR s přibývajícím počtem fixací se nepotvrdil, avšak je nutno podotknout, že charakter dat nenahrává zcela objektivním výsledkům. Jelikož participantů s průměrným vyšším počtem fixacím je výrazně méně.

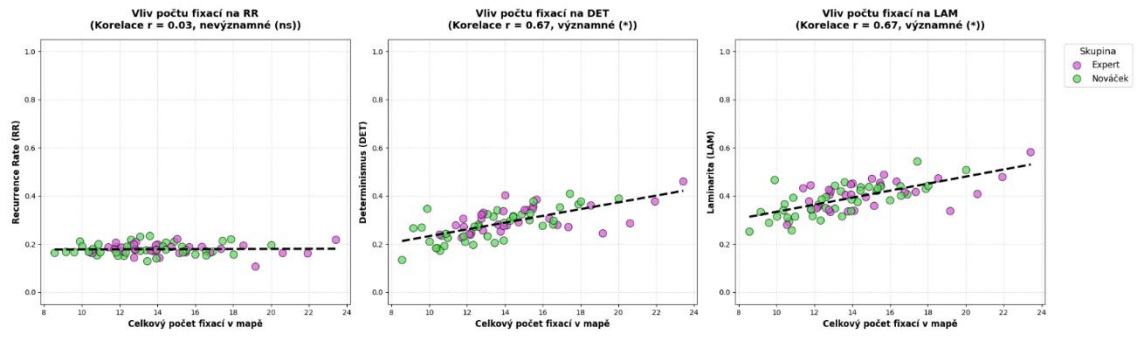
Nicméně grafy DET i LAM v obou přístupech ukazují, že participantů s přibývajícím počtem fixací neupadají do chaosu, ba naopak se jejich DET zvyšuje, což značí lepší systematickosti.

Klesající hodnoty RR u AOI přístupu se stoupajícím počtem fixací mohou značit, že při dlouhém řešení úkolu sice respondenti nefixují stále stejné velké AOI, nýbrž se uchýlí i k ostatním menším AOI, čímž neroste tolik RR, ale protože verifikují svoje rozhodnutí, tak roste DET a LAM.



Obr. 22: Vliv počtu fixací na jednotlivé metriky (AOI přístup)

Vliv počtu fixací na jednotlivé metriky (Přístup XY | Průměrné profily respondentů)



Obr. 23: Vliv počtu fixací na jednotlivé metriky (XY přístup)

## 5 DOPORUČENÍ PRO BUDOUCÍ VÝZKUMNÍKY

Na základě poznatků získaných při implementaci a vyhodnocování rekurentní kvantifikační analýzy nad eye-tracking daty v kartografii lze zformulovat sadu doporučení, která mohou budoucím výzkumníkům pomoci optimalizovat design experimentů a vyhnout se metodologickým zkreslením. Tato doporučení se týkají jak samotné přípravy testování, tak následného výpočetního zpracování.

### 5.1 Návrh experimentu a specifika stimulů

#### 5.1.1 Oblasti zájmu (AOI)

Při použití AOI přístupu k RQA je kriticky důležité dbát na vyváženou velikost definovaných oblastí. Jak se ukázalo při srovnání vnitřní struktury stimulů, velké a nehomogenní oblasti (např. velké oblast mapového pole) uměle zvyšují pravděpodobnost rekurence a mohou vést k nadhodnocení metrik oproti menším, informačně nahuštěným oblastem (např. legenda). Tento poznatek souvisí s formulacemi Šašinky et al. (2021), kteří upozorňují, že definování oblastí zájmu (AOI) je v kartografii často vysoce subjektivní a problematické. Na nutnost vyhnout se umělému definování hranic objektů poukazují i (Anderson et al. 2023), pro něž je prostorová RQA založená na euklidovské vzdálenosti řešením těchto interpretačních zkreslení.

#### 5.1.2 Struktura úlohy

Pokud je cílem experimentu zkoumat rozdíly mezi experty a nováčky, jak to úspěšně provedli například (Vaidyanathan et al. 2014), design stimulu a zadané úlohy musí umožňovat volnější explorační. Silně strukturované úlohy, tak jako tomu bylo v experimentu Vítkové (2024), mohou uživatele donutit k uplatnění jednotné čtecí strategie, čímž se eliminují přirozené expertní zkratky a strategie obou skupin splynou. Samotná povaha úlohy také silně ovlivňuje počet fixací. Pro srovnávání metrik RQA je velmi vhodné, aby porovnávání účastníci měli podobně dlouhé sekvence fixací. U extrémně dlouhých sekvencí se sice nabízí brát v potaz pouze určitou část (prvních 10, 15 nebo 20), avšak tím může být zkreslena samotná strategie účastníka, který postupuje pomalu a rozvážně, což je také považováno za validní postup. Dále by tímto zkrácením sekvence fixací mohl být oříznut moment, ve kterém účastník přišel na dle jeho mínění správnou odpověď, což může vyvolat nežádoucí zkreslení.

Aby se projevil rozdíl v kognitivních strategiích expertů a nováčků, měl by experiment nabídnout prostor pro volnou explorační a řešení složitějšího problému, obdobně jako experiment (Vaidyanathan et al. 2014), kde měli experti a nováčci z oboru dermatologie provést „vyšetření“ na základě stimulu, která obsahoval fotografie reálných dermatologických pacientů.

Stimulem by se nabízela komplexní tematická mapa, která znázorňuje výškopis například vrstevnicemi namísto metodou plošných znaků, a zároveň obsahuje i hustější polohopis (cesty, zástavba, vodstvo). Optimální mapou by tak mohla být velmi podrobná turistická mapa horské oblasti velkého měřítka. Ruku v ruce s tím by pak stimul obsahoval i složitou legendu, která by podnítila detailnější a náročnější řešení problému.

Namísto šipky, určující zadání úkolu, která již sama o sobě upoutává pozornost účastníka, by stimul obsahoval body A a B. Zadání by tak z jednoduchého najděte a přiřaďte znělo: Navrhněte nejbezpečnější a zároveň co nejrychlejší trasu pro pěší přesun z bodu A do B. Na trase je nutné se vyhnout terénu s velkým sklonem a je zakázáno brodit řeky, zároveň se vyhněte chráněným přírodním zónám. Úloha nemá předem určené řešení a vyžaduje práci s více mapovými vrstvami zároveň. Obdobné zadání nabízí i mapy pro orientační běh, které ještě silně podléhají expertní znalosti mapového klíče (les bílým plošným znakem). Zároveň taktéž splňují komplexní zadání (navrhnout co nejrychlejší trasu, která spojuje n bodů v mapě).

## **5.2 Implementace RQA**

### **5.2.1 Výpočet rádiusu XY přístupu**

Stanovení rádiusu pro posouzení rekurentních fixací v metrické RQA by sice mohlo vycházet z hrubých odhadů podložených odbornou literaturou – jak uvádí například Gurtner et al. (2019) s typickou tolerancí 1 až 2 stupňů zorného úhlu, případně Pérez et al. (2018) aplikující hodnotu 64 pixelů pro 2° úhel – ovšem doporučuje se hodnotu vždy vypočítat na základě fyzických parametrů (rozlišení a úhlopříčka monitoru, vzdálenost respondenta, zorný úhel fovey), aby analýza respektovala reálné fyziologické možnosti lidského zraku. Nejdůležitějším parametrem výpočtu je vzdálenost účastníka od monitoru, která vzhledem k výpočetnímu vzorci značně ovlivňuje výslednou hodnotu. Tato vzdálenost však může být proměnlivá pro každého účastníka čili je doporučeno tuto vzdálenost držet co nejkonstantnější. Ve vytvořeném skriptu jsou parametry automaticky vyplněny na obvyklé hodnoty (rozlišení monitoru), avšak je možné je volně nastavovat jinak.

### **5.2.2 Souběžné použití obou přístupů**

Výsledky prokázaly, že volba mezi AOI a XY přístupem může vést k odlišným až protichůdným interpretacím chování (např. při srovnání legendy a mapového pole). Budoucím studiím se proto doporučuje aplikovat oba přístupy paralelně pro zajištění vyšší objektivity. Zároveň ve vizualizaci RQA pomocí Worm plotu s XY přístupem je nutné zakomponovat i některá AOI, jelikož vizualizace pouhých fixací bez barevně odlišených AOI znemožňuje snadnou interpretaci.

## **5.3 Interpretace výsledků**

Průměrování metrik RQA za celou dobu trvání úlohy často skrývá nejdůležitější kognitivní zlomy. Sledování vývoje metrik v čase (např. pomocí Worm Plotů či Heatmap Stripů) je pro pochopení strategií vhodnější. Přesně v souladu se závěry Vojtěchovské et al. (2025) aplikace takzvané Running RQA (RRQA) umožňuje detekovat fázové přechody a dynamiku zrakové reinspekce – momenty, kdy respondent přechází od prvotní orientace ke strukturovanému čtení (aha-moment). Nelze tedy striktně a slepě spoléhat na porovnání výsledných statických hodnot metrik (jako je celkové zhodnocení tzv. trapping time pomocí laminarity, na které upozorňují Gurtner et al. (2019)), jelikož postup a kognitivní děje, jakým účastníci k této konečné hodnotě došli, se mohou významně lišit.

## 6 DISKUZE

Předložená bakalářská práce se zaměřuje na posouzení využitelnosti rekurentní kvantifikační analýzy (RQA) pro interpretaci očních pohybů při čtení statických map. Ačkoliv je sledování očních pohybů v kognitivní kartografii již etablovanou metodou, aplikace nelineárních metod typu RQA zde přinesla specifické metodologické i interpretační výzvy.

Jedním z nejvýraznějších zjištění práce, analyzovaným v rámci srovnání expertů a nováčků, byla absence statisticky významných rozdílů v metrikách RQA (RR, DET, LAM). Tento výsledek je v kontrastu se závěry studie Vaidyanathana et al. (2014), u nichž se expertní chování projevovalo méně repetitivními a více náhodnými skenovacími drahami než u nováčků. Tuto odlišnost od literárních předpokladů lze přisoudit charakteru použitých stimulů a úzce vymezenému zadání úlohy ve využitém experimentu Vítkové (2024). Úkol vyžadující přiřazení konkrétního barevného odstínu k intervalu v legendě si u obou skupin pravděpodobně vynutil přístup čtení nepodmíněný jejich úrovní expertízy nebo u obou skupin vyvolal tentýž vzorec fixací způsobený přímočarým zadáním. Výsledky tak naznačují, že detekce expertních strategií pomocí standardní RQA může být značně limitována, pokud design experimentu neumožňuje volnější, nestrukturovanou explorační stimulaci.

Problémem, na který práce narazila, byla definice rekurencí. Souběžná aplikace AOI přístupu a XY přístupu (euklidovská vzdálenost) odhalila markantní rozdíly ve výsledcích. AOI přístup generoval nepoměrně vyšší hodnoty metrik v plošně rozsáhlém mapovém poli, což poukazuje na potenciálně vysokou náchylnost kategorické RQA na to, jak subjektivně a asymetricky jsou definovány hranice jednotlivých oblastí zájmu. Toto zjištění přímo potvrzuje tezi Šašinky et al. (2021), kteří upozorňují, že definování AOI je v kartografii často subjektivní a problematické. Jako objektivnější řešení se proto v této práci jeví metrická RQA (XY přístup) s exaktně vypočítaným rádiusem na základě fyzických parametrů monitoru a zorného pole fovey, namísto pouhého expertního odhadu či spoléhání se na nestejnoměrné polygonální zóny. Tento postup koresponduje s přístupem Péreze et al. (2018) a Andersona et al. (2023), kteří rekurenci v eye-trackingu definovali striktně na základě euklidovské prahové vzdálenosti.

Limitem analýzy byla rovněž značná variabilita v počtu fixací u jednotlivých respondentů. Práce tento problém částečně řešila vyřazením odlehklých měření pomocí metody mezikvartilového rozpětí (IQR) pro každý stimul zvlášť. Při zpracování časových řad je možné využít i alternativní přístupy, jako je SWRQA (Sliding Window RQA), která byla aplikována v jiných oblastech výzkumu. Aplikace fixních "oken" se však u relativně krátkých či různě dlouhých očních sekvencí ukazuje jako problematická, neboť nedokáže zachytit rekurence přesahující velikost daného okna. Z toho důvodu nebyl podobný přístup umělé segmentace v této práci uplatněn, aby nedošlo k odstranění klíčových momentů řešení úlohy u pomalejších čtenářů a k celkovému zkreslení jejich přirozené vizuální strategie.

Právě plynulost a zamezení umělé segmentaci zdůrazňuje význam dosažených výsledků, zejména pak vizualizace časového vývoje metrik prostřednictvím Running RQA (RRQA), které ilustrují možnosti posunu k dynamičtějšímu chápání vnímání respondenta při práci s mapou. Aplikace tohoto přístupu navazuje na studii Vojtěchovské et al. (2025) a prokazuje, že RRQA (a vizualizace prostřednictvím Heatmap Stripů či Worm Plotů) dokáže zachytit časové posuny v re-fixačních vzorcích, které zůstávají při použití standardní RQA nebo běžných očních metrik skryty.

Analýza průběžných časových řad naznačila silný potenciál pro detekci kognitivních fázových přechodů. Identifikované zlomové momenty, ztotožnitelné se strmými nárůsty determinismu, mohou indikovat přechod od prvotní chaotické orientace k systematické strategii. Schopnost spojovat metriky RRQA s identifikací takovýchto specifických kognitivních událostí otevírá široké možnosti; v literatuře se hovoří například o detekci změn v rozhodovacích strategiích ((Glöckner a Herbold 2011); Orquin a Mueller Loose 2013) či o změnách kognitivní zátěže (Sáiz-Manzanares et al. 2024).

Pro spolehlivé potvrzení identifikovaných předpokladů na kartografických datech si však daná problematika žádá další experimentální zkoumání. Za přínos této práce pro budoucí výzkum lze proto považovat sestavený interaktivní open-source nástroj v prostředí Google Colab. Tento výpočetní rámec nabízí možnost výpočtu metrik ze standardizovaných dat (z aplikace GazePlotter). Námětem pro další pokračování je nasazení tohoto nástroje na nová data z méně strukturovaných úloh, což by mělo umožnit ještě výraznější projev a spolehlivou detekci individuálních strategií participantů.

## 7 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce s názvem „Využití rekurentní kvantifikační analýzy pro interpretaci očních pohybů při čtení statických map“ se věnovala posouzení využitelnosti pokročilé nelineární metody RQA v oblasti kognitivní kartografie. Hlavním cílem práce bylo prověřit, zda a do jaké míry dokážou metriky rekurenční analýzy odhalit skryté kognitivní strategie uživatelů, které zůstávají při použití tradičních lineárních metod eye-trackingu skryty.

Práce byla realizována nad datasetem z experimentu diplomové práce Mgr. Terezy Vítkové (2024), který se zaměřoval na uživatelské testování barevných stupnic. K naplnění vytyčených cílů byl vyvinut ucelený metodický a výpočetní rámec v prostředí Google Colab. Tento interaktivní open-source nástroj v jazyce Python umožňuje automatizované zpracování eye-trackingových dat od prvotního čištění a filtrace outlierů přes matematický výpočet foveálního rádiusu až po samotný výpočet RQA metrik.

V rámci praktické části byly definovány a realizovány tři hlavní a dva doplňující analytické scénáře. Komparace dvou odlišných výpočetních přístupů (AOI a XY) prokázala, že volba metodiky určení rekurencí zásadně ovlivňuje výsledné hodnoty metrik. Zatímco AOI přístup vykazoval tendenci k nadhodnocování systematičnosti v rozsáhlých mapových polích, metrický XY přístup se ukázal jako objektivnější, neboť reflektuje reálné fyziologické limity lidského zraku, avšak kombinované využití obou scénářů se ukázalo jako akceptovatelné ve větvi Running RQA (RRQA), pro snadněji interpretovatelné vizualizace.

Analýza globálních profilů (Scénář 1) odhalila, že v rámci specificky strukturované úlohy zaměřené na vyhledávání v legendě se kognitivní strategie expertů a nováčků nelišily tak výrazně, jak bylo původně předpokládáno. Nejprínosnější částí analýzy se ukázalo sledování časové dynamiky pomocí Running RQA (Scénář 3). Tato metoda umožnila exaktně lokalizovat momenty stabilizace pohledu a tzv. fázové přechody, kdy uživatel přechází od počáteční orientace k uplatnění pevných vyhledávacích strategií.

Přínosem práce je také vytvoření funkčního a snadno replikovatelného nástroje, který překonává bariéru mezi složitým matematickým pozadím nelineární dynamiky a praktickou potřebou kartografického výzkumu. Práce demonstruje, že RQA je validní metodou pro kvantifikaci systematičnosti (Determinismus) a stability (Laminarita) vizuální pozornosti, a poskytuje budoucím výzkumníkům jasná doporučení, jak se vyhnout metodologickým zkreslením.

Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle bakalářské práce byly v jejich rozsahu naplněny. Práce nepředstavuje pouze teoretickou studii, ale především praktický příspěvek k rozvoji analytických metod v kognitivní kartografii, který otevírá cestu k hlubšímu porozumění interakce mezi člověkem a mapovým dílem.

## POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- ANDERSON, Nicola C; Walter F BISCHOF; Kaitlin E W LAIDLAW; Evan F RISKO a Alan KINGSTONE, 2023. Recurrence quantification analysis of eye movements. Online. Dostupné z: doi:10.3758/s13428-012-0299-5
- CAIRNS, Paul a Anna L. COX, ed., 2008. *Research methods for human-computer interaction*. Online. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-0-511-81457-0. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511814570
- CARTER, Benjamin T. a Steven G. LUKE, 2020. Best practices in eye tracking research. *International Journal of Psychophysiology*. Online. **155**, 49–62 [vid. 2026-04-11]. ISSN 01678760. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010
- CRISTINO, Filipe; Sebastiaan MATHÔT; Jan THEEUWES a Iain D. GILCHRIST, 2010. ScanMatch: A novel method for comparing fixation sequences. *Behavior Research Methods*. Online. **42**(3), 692–700 [vid. 2026-04-11]. ISSN 1554-351X, 1554-3528. Dostupné z: doi:10.3758/BRM.42.3.692
- DAKOS, Vasilis; Chris A. BOULTON; Joshua E. BUXTON; Jesse F. ABRAMS; Beatriz ARELLANO-NAVA; David I. ARMSTRONG MCKAY; Sebastian BATHIANY; Lana BLASCHKE; Niklas BOERS; Daniel DYLEWSKY; Carlos LÓPEZ-MARTÍNEZ; Isobel PARRY; Paul RITCHIE; Bregje VAN DER BOLT; Larissa VAN DER LAAN; Els WEINANS a Sonia KÉFI, 2024. Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics*. Online. **15**(4), 1117–1135 [vid. 2026-04-11]. ISSN 2190-4987. Dostupné z: doi:10.5194/esd-15-1117-2024
- FAIRBAIRN, David a Jess HEPBURN, 2023. Eye-tracking in map use, map user and map usability research: what are we looking for? *International Journal of Cartography*. Online. **9**(2), 231–254 [vid. 2026-04-11]. ISSN 2372-9333, 2372-9341. Dostupné z: doi:10.1080/23729333.2023.2189064
- GLÖCKNER, Andreas a Ann-Katrin HERBOLD, 2011. An eye-tracking study on information processing in risky decisions: Evidence for compensatory strategies based on automatic processes. *Journal of Behavioral Decision Making*. Online. **24**(1), 71–98 [vid. 2026-05-03]. ISSN 0894-3257, 1099-0771. Dostupné z: doi:10.1002/bdm.684
- GURTNER, Lilla M.; Walter F. BISCHOF a Fred W. MAST, 2019. Recurrence quantification analysis of eye movements during mental imagery. *Journal of Vision*. Online. **19**(1), 17 [vid. 2026-04-11]. ISSN 1534-7362. Dostupné z: doi:10.1167/19.1.17
- HENDERSON, John M. a Fernanda FERREIRA, ed., 2004. *The interface of language, vision, and action: eye movements and the visual world*. Online. New York: Psychology Press. ISBN 978-0-415-64865-3. Dostupné z: doi:10.4324/9780203488430
- HOLMQVIST, Kenneth; Marcus NYSTRÖM; Richard ANDERSSON; Richard DEWHURST; Halszka JARODZKA a Joost van de WEIJER, 2011. Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures. *EBL*.
- CHEKALUK, Eugene a Keith LLEWELLYN, 1992. *The role of eye movements in perceptual processes*. Amsterdam [etc.]: North-Holland. Advances in psychology, 88. ISBN 978-0-444-89005-4.
- KOOP, Gregory J. a Joseph G. JOHNSON, 2011. Response dynamics: A new window on the decision process. *Judgment and Decision Making*. Online. **6**(8), 750–758 [vid. 2026-04-11]. ISSN 1930-2975. Dostupné z: doi:10.1017/S1930297500004186
- MARWAN, N; M CARMENROMANO; M THIEL a J KURTHS, 2007. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*. Online. **438**(5–6), 237–329 [vid. 2026-04-11]. ISSN 03701573. Dostupné z: doi:10.1016/j.physrep.2006.11.001

- ORQUIN, Jacob L. a Simone MUELLER LOOSE, 2013. Attention and choice: A review on eye movements in decision making. *Acta Psychologica*. Online. **144**(1), 190–206 [vid. 2026-05-03]. ISSN 00016918. Dostupné z: doi:10.1016/j.actpsy.2013.06.003
- PÉREZ, David López; Alicja RADKOWSKA; Joanna RACZASZEK-LEONARDI; Przemyslaw TOMALSKI; a THE TALBY STUDY TEAM, 2018. Beyond fixation durations: Recurrence quantification analysis reveals spatiotemporal dynamics of infant visual scanning. *Journal of Vision*. Online. **18**(13), 5 [vid. 2026-04-11]. ISSN 1534-7362. Dostupné z: doi:10.1167/18.13.5
- POINCARÉ, Jules Henri, 1890. Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. In: *Acta Mathematica*.
- POPELKA, Stanislav, 2018. *Eye-Tracking (nejen) V Kognitivní Kartografii. Praktický Průvodce Tvorbou a Vyhodnocením Experimentu*. 1st ed. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-5313-2.
- POPELKA, Stanislav; Tereza VÍTKOVÁ a Kamila FAČEVICOVÁ, 2024. Influence of cartographic training on color scale usability. *Abstracts of the ICA*. Online. **7**, 1–2 [vid. 2026-04-11]. ISSN 2570-2106. Dostupné z: doi:10.5194/ica-abs-7-128-2024
- SÁIZ-MANZANARES, María Consuelo; Raúl MARTICORENA-SÁNCHEZ; Luis J. MARTÍN ANTÓN; Irene GONZÁLEZ-DÍEZ a Miguel Ángel CARBONERO MARTÍN, 2024. Using Eye Tracking Technology to Analyse Cognitive Load in Multichannel Activities in University Students. *International Journal of Human–Computer Interaction*. Online. **40**(12), 3263–3281 [vid. 2026-05-03]. ISSN 1044-7318, 1532-7590. Dostupné z: doi:10.1080/10447318.2023.2188532
- SANTANA, Leika Irabele Tenório De; Antonio Samuel Alves Da SILVA; Rômulo Simões Cezar MENEZES a Tatijana STOSIC, 2020. Recurrence quantification analysis of monthly rainfall time series in Pernambuco, Brazil. *Research, Society and Development*. Online. **9**(9), e637997737 [vid. 2026-04-11]. ISSN 2525-3409. Dostupné z: doi:10.33448/rsd-v9i9.7737
- SYLOS LABINI, Francesca; Annalisa MELI; Yuri P. IVANENKO a Davide TUFARELLI, 2012. Recurrence quantification analysis of gait in normal and hypovestibular subjects. *Gait & Posture*. Online. **35**(1), 48–55 [vid. 2026-04-11]. ISSN 09666362. Dostupné z: doi:10.1016/j.gaitpost.2011.08.004
- ŠAŠINKA, Čeněk; Zdeněk STACHOŇ; Jiří ČENĚK; Alžběta ŠAŠINKOVÁ; Stanislav POPELKA; Pavel UGWITZ a David LACKO, 2021. A comparison of the performance on extrinsic and intrinsic cartographic visualizations through correctness, response time and cognitive processing. *PLOS ONE*. Online. **16**(4), e0250164 [vid. 2026-04-11]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0250164
- VAIDYANATHAN, Preethi; Jeff PELZ; Cecilia ALM; Pengcheng SHI a Anne HAAKE, 2014. Recurrence quantification analysis reveals eye-movement behavior differences between experts and novices. In: *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications*.
- VÍTKOVÁ, Tereza, 2024. *Uživatelské testování barevných stupnic v kartografii*. Online. Neuvedeno [vid. 2026-04-13]. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: [https://theses.cz/id/4crwpq/#panel\\_latex](https://theses.cz/id/4crwpq/#panel_latex)
- VOJTECHOVSKA, Michaela; Markéta MUCZKOVÁ a Stanislav POPELKA, 2025. Exploring Gaze Re-Inspection Dynamics with Running Recurrence Quantification Analysis (RRQA). In: *ETRA '25: 2025 Symposium on Eye Tracking Research and Applications: Proceedings of the 2025 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. Online. Tokyo Japan: ACM, s. 1–7 [vid. 2026-04-11]. ISBN 979-8-4007-1487-0. Dostupné z: doi:10.1145/3715669.3725875

VOJTECHOVSKA, Michaela a Stanislav POPELKA, 2026. GazePlotter: An open-source solution for the automatic generation of scarf plots from eye-tracking data. *Behavior Research Methods*. Online. **58**(3), 85 [vid. 2026-04-14]. ISSN 1554-3528. Dostupné z: doi:10.3758/s13428-026-02959-5

WEBBER, C. L. a J. P. ZBILUT, 1994. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. *Journal of Applied Physiology*. Online. **76**(2), 965–973 [vid. 2026-04-11]. ISSN 8750-7587, 1522-1601. Dostupné z: doi:10.1152/jappl.1994.76.2.965

WILLIAMS, L.G., 1971. The Role Of The User In The Map Communication Process: Obtaining Information From Displays With Discrete Elements. *Cartographica*. Online. **8**(2), 29–34 [vid. 2026-04-11]. ISSN 0317-7173, 1911-9925. Dostupné z: doi:10.3138/A724-2K5V-2887-P200

ZIMATORE, Giovanna; Cassandra SERANTONI; Maria Chiara GALLOTTA; Marco MEUCCI; Laurent MOUROT; Dafne FERRARI; Carlo BALDARI; Marco DE SPIRITO; Giuseppe MAULUCCI a Laura GUIDETTI, 2024. Recurrence Quantification Analysis Based Methodology in Automatic Aerobic Threshold Detection: Applicability and Accuracy across Age Groups, Exercise Protocols and Health Conditions. *Applied Sciences*. Online. **14**(20), 9216 [vid. 2026-04-11]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app14209216

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## Volné přílohy:

Příloha 1 Poster

## Elektronické přílohy

Příloha 2 Vstupní data v segmentované podobě z GazePlotter

Příloha 3 Tabulka participantů a jejich zkušeností

Příloha 4 Zpracované metriky RQA, XY přístup

Příloha 5 Zpracované metriky RQA, AOI přístup

Příloha 6 Skript ve formátu .ipynb (taktéž dostupný v GitHub repozitáři KGI)

## Popis struktury a obsahu odevzdávaných digitálních dat na datové úložiště katedry

Digitální data obahují data v těchto adresářích:

brandejs26

text\_prace (text formát MS Word a PDF):

*brandejs\_BP.docx, brandejs\_BP.pdf*

vstupni\_data:

*GazePlotter-SegmentedData.csv*

*participant\_table.tsv*

vystupni\_data:

*rqa\_results\_AOI.csv*

*rqa\_results\_XY.csv*

web

Poster:

*Brandejs\_poster.pdf*