

**Univerzita Palackého v Olomouci**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**

**TVORBA A TESTOVÁNÍ MAPY OVLÁDANÉ  
POHYBEM OČÍ**

**Diplomová práce**

**Bc. Kateřina SAZIMOVÁ**

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

**Olomouc 2026**

**Geoinformatika a kartografie**

## **ANOTACE**

Využití technologie sledování pohybu očí (eye-tracking) představuje alternativní přístup pro interakci s webovými mapovými aplikacemi. Zatímco v kartografii je eye-tracking tradičně používán především pro analýzu vizuální pozornosti a hodnocení použitelnosti map, tato práce se zaměřuje na jeho využití v roli aktivního ovládacího prvku. Hlavním cílem bylo navrhnout a implementovat webovou mapu, která využívá pohled jako vstupní modalitu, a následně ověřit efektivitu bezkontaktního ovládní mapy v porovnání s tradiční interakcí pomocí myši.

Teoretická část práce shrnuje poznatky z oblasti interakce člověk-počítač, principy fungování eye-trackingu a specifika očních pohybů v kontextu interakcí se systémem založeným na pohledu. Praktická část popisuje vývoj pěti variant mapových rozhraní, které kombinují prvky ovládní pomocí myši a pohledu, v prostředí standardních webových programovacích jazyků a s využitím knihovny MapLibre GL JS. Propojení s eye-trackingovými brýlemi Pupil Labs Neon zajišťuje systém GazeDeck Console vyvinutý Mgr. Michaelou Vojtěchovskou. Zdrojový kód testovací platformy je dostupný ve veřejném repozitáři na platformě GitHub.

Součástí práce je uživatelské testování s 13 respondenty, zaměřené na srovnání rychlosti a komfortu ovládní. Výsledky studie ukazují, že ačkoli čistě bezkontaktní ovládní v současnosti nedosahuje rychlosti a efektivity tradičního ovládní pomocí myši, představuje perspektivní doplněk pro specifické uživatelské scénáře. Výstupy práce mohou sloužit jako podklad pro další vývoj asistivních technologií a multimodálních rozhraní v geoinformatice.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

interakce člověk-počítač (HCI); eye-tracking; interakce založená na pohledu (GBI); webová kartografie

Počet stran práce: 48

Počet příloh: 5 (z toho 1 volná a 5 elektronických)

## **ANNOTATION**

The use of eye-tracking technology, which enables tracking the direction of a user's gaze, offers an alternative approach to interacting with web-based map applications. While in cartography, primarily used to analyze visual attention and evaluate map usability, this thesis focuses on its use as an active control element. The main objective was to design and implement a web map that uses gaze as an input modality and subsequently verify the effectiveness of hands-free map control compared to traditional mouse-based interaction.

The theoretical part of the thesis summarizes findings from the field of human-computer interaction, the principles of eye-tracking, and the specifics of eye movements in the context of gaze-based system interactions. The practical part describes the development of five variants of map interfaces combining mouse and gaze-based interactions, implemented using standard web technologies and the MapLibre GL JS library. Integration with Pupil Labs Neon eye-tracking glasses is provided by the GazeDeck Console system, developed by Mgr. Michaela Vojtěchovská. The source code of the testing platform is available in a public repository on GitHub.

The thesis includes user testing with 13 respondents, focusing on comparing the speed and comfort of interaction. The results show that although purely hands-free control does not achieve the speed and efficiency of traditional mouse-based interaction, it represents a promising complement for specific user scenarios. The findings of this thesis can serve as a basis for further development of assistive technologies and multimodal interfaces in geoinformatics.

## **KEYWORDS**

human-computer interaction (HCI); eye tracking; gaze-based interaction (GBI); web cartography

Number of pages: 48

Number of appendixes: 5

**Prohlašuji, že**

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědoma, že na moji 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, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

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

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

- použít výsledky a výstupy mé 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 vedoucímu práce doc. RNDr. Stanislavu Popelkovi, Ph.D., za cenné podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji konzultantce Mgr. Michaele Vojtěchovské za odbornou pomoc v praktické části práce. V neposlední řadě děkuji svým blízkým za podporu a ochotu vyzkoušet ovládání webové mapy pohybem očí.

# UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2024/2025

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Kateřina SAZIMOVÁ  
Osobní číslo: R240575  
Studijní program: N0532A330009 Geoinformatika a kartografie  
Téma práce: Tvorba a testování mapy ovládané pohybem očí  
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

### Zásady pro vypracování

Cílem práce je vytvoření mapy ovládané pomocí pohybu očí. Studentka navrhne vhodnou případovou studii či studii, u kterých by se dalo předpokládat, že ovládní pomocí pohybu očí bude přínosné. Není však nutné, aby byla mapa ovládnuta výhradně pomocí očí, nabízí se i kombinace s tradičními modalitami (např. stisk klávesy). Následně naprogramuje mapové rozhraní s využitím javascriptové knihovny Develex-Core vytvořené pro interpretaci real-time eye-tracking dat ve webovém prostředí. Předpokládá se, že mapové rozhraní bude vytvořeno pomocí javascriptu, volba konkrétních nástrojů je však na studentce. Výsledný zdrojový kód bude verzován technologií GIT a publikován jako open-source pomocí služby GitHub. Posledním krokem bude praktické ověření a otestování funkcionality mapy a porovnání s tradičním způsobem ovládní pomocí myši a klávesnice.

Text práce studentka zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O diplomové práci studentka vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá studentka v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG studentka odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky studentka odevzdá výtisk posteru ve formátu A2 a přílohy určené vedoucím práce.

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

### Seznam doporučené literatury:

Popelka, S. (2018). Eye-tracking (nejen) v kognitivní kartografii: Praktický průvodce tvorbou a vyhodnocením experimentu. Univerzita Palackého v Olomouci pro katedru geoinformatiky.

Stellmach, S., & Dachselt, R. (2012). Investigating gaze-supported multimodal pan and zoom. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, 357–360. <https://doi.org/10.1145/2168556.2168636>

Çöltekin, A., Hempel, J., Brychtová, A., Giannopoulos, I., Stellmach, S., & Dachselt, R. (2016). Gaze and feet as additional input modalities for interacting with geospatial interfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–2, 113–120. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-2-113-2016>

Göbel, F., Kiefer, P., Giannopoulos, I., Duchowski, A. T., & Raubal, M. (2018). Improving map reading with gaze-adaptive legends. *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 1–9. <https://doi.org/10.1145/3204493.3204544>

Keskin, M., & Kettunen, P. (2023). Potential of eye-tracking for interactive geovisual exploration aided by machine learning. *International Journal of Cartography*, 9(2), 150–172. <https://doi.org/10.1080/23729333.2022.2150379>

Majaranta, P., Riihå, K.-J., Hyrskykari, A., & Špakov, O. (2019). Eye movements and human-computer interaction. In C. Klein & U. Ettinger (Eds.), *Eye movement research* (pp. 971–1015). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5_23)

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Stanislav Popelka, Ph.D.**  
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: **9. prosince 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **4. května 2026**

LS.

---

**prof. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.**  
děkan



---

**prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 10. prosince 2024

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>12</b>
2.1 Interakce člověk-počítač .....	12
2.2 Eye-tracking zařízení.....	13
2.3 Pohyby očí .....	14
2.4 Interakce založené na pohledu.....	15
2.4.1 Využití očních pohybů pro GBIs.....	15
2.4.2 Možnosti a limity využití zraku jako vstupní modality.....	17
2.4.3 Multimodální interakce.....	19
2.5 Systémový design.....	20
2.6 Webová kartografie .....	20
<b>3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>22</b>
<b>4 VÝVOJ WEBOVÉ MAPY OVLÁDANÉ POHYBEM OČÍ.....</b>	<b>26</b>
4.1 Architektura systému a hardwarové vybavení .....	26
4.2 Návrh testovací platformy.....	26
4.3 Zpracování prostorových dat a vizualizace .....	28
4.4 Návrh uživatelského rozhraní .....	30
4.5 Logika ovládání pohledem .....	30
4.6 Kompatibilita a interní testování platformy .....	32
4.7 Konfigurace a spuštění platformy .....	33
<b>5 UŽIVATELSKÉ TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>34</b>
5.1 Výzkumný vzorek.....	34
5.2 Průběh testování.....	34
5.3 Metody sběru dat .....	36
<b>6 VÝSLEDKY .....</b>	<b>38</b>
6.1 Interaktivní testovací platforma .....	38
6.2 Analýza časové náročnosti.....	38
6.3 Hodnocení uživatelské zkušenosti .....	40
6.4 Analýza kvalitativní zpětné vazby.....	42
6.5 Doprovodné materiály diplomové práce.....	43
<b>7 DISKUZE .....</b>	<b>44</b>
<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>47</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE.....</b>	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma-Separated Values
GBI	Gaze-Based Interaction (interakce založená na pohledu)
GBIs	Gaze-Based Interactions (mn. č.)
GL	Graphics Library
HCI	Human-Computer Interaction (interakce člověk-počítač)
HTML	HyperText Markup Language
JS	JavaScript
JSON	JavaScript Object Notation
MD	MarkDown
OSM	OpenStreetMap
PNG	Portable Network Graphics
UEQ	User Experience Questionnaire (dotazník uživatelské zkušenosti)
UP	Univerzita Palackého
URL	Uniform Resource Locator
VS Code	Visual Studio Code
WGS84	World Geodetic System 1984
WS	WebSocket
YAML	Yet Another Markup Language

# ÚVOD

Cílem studií zabývajících se interakcí člověk-počítač je navrhnout systémy, které jsou efektivní a uživatelsky přívětivé (Sharples, 1996). S rostoucí integrací počítačových systémů do každodenního života se zvyšují také nároky na intuitivnost ovládání a na snižování kognitivní zátěže uživatelů. Tradiční vstupní zařízení, jako jsou myš a klávesnice, zůstávají dominantním prostředkem interakce, avšak v řadě situací narážejí na své limity, zejména v situacích vyžadujících bezkontaktní ovládání (Majaranta a kol., 2019). Proto se rozvíjejí alternativní přístupy usilující o vytvoření přirozených uživatelských rozhraní, která se snaží více odpovídat mentálním modelům a přirozeným schopnostem uživatele (Wigdor a Wixon, 2011).

Jednou z těchto technologií je sledování pohybu očí. V oblasti kartografie a geoinformatiky je eye-tracking využíván především pro hodnocení map. Jeho potenciál jako přímé vstupní modality pro aktivní ovládání webových mapových rozhraní však zůstává zatím stále málo prozkoumán (Vojtechovska a kol., 2025). Hlavní výzvou při zavádění interakcí založených na pohledu do kartografie zůstává otázka použitelnosti. Propojení neustálého toku vizuálních informací se záměrným ovládáním systému přináší specifické problémy, mezi které patří zejména spolehlivé rozlišení záměrné a nezáměrné interakce. Použití zraku jako interakční modality nejenom rozšiřuje stávající repertoár vstupních zařízení, ale zároveň otevírá nové možnosti pro přirozenější práci s prostorovými daty, zejména v situacích, kdy je žádoucí bezkontaktní nebo asistivní forma interakce (například u osob s motorickým postižením nebo v prostředích vyžadujících zvýšenou flexibilitu práce s rozhraním).

Hlavním záměrem této práce je návrh a implementace webové mapy umožňující interakci prostřednictvím sledování pohybu očí a následné ověření efektivity tohoto způsobu ovládání v porovnání s tradiční intrakcí pomocí myši. V rámci praktické části byla vytvořena testovací platforma, která obsahuje pět webových map kombinujících prvky ovládání pomocí pohledu a myši. Platforma využívá pro detekci pohledu eye-trackingové brýle Pupil Labs Neon a pro interpretaci těchto dat v reálném čase systém GazeDeck Console. Výsledky uživatelského testování s 13 respondenty poskytují vhled do budoucího potenciálu multimodálních rozhraní v moderní kartografii.

# 1 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je vytvoření mapy ovládané pomocí pohybu očí. Výsledná webová mapa nemusí být nutně ovládaná výhradně pohledem, ale nabízí se efektivní kombinace s tradičními modalitami, jako je myš nebo klávesnice. Hlavní cíl zahrnuje návrh vhodných případových studií, u kterých by se dalo předpokládat, že bude tento typ ovládání přínosný. Samotná webová mapa bude vyvinuta v jazyce JavaScript s využitím libovolných nástrojů a knihoven.

Původní zadání práce předpokládalo využití knihovny Develx-Core, která je navržena pro interpretaci real-time eye-tracking dat primárně pro stacionární eye-trackery. Avšak po odborné konzultaci bylo rozhodnuto o využití modernějšího nositelného zařízení, konkrétně eye-trackingových brýlí Pupil Neon. Z tohoto důvodu bude skutečná implementace realizována s využitím systému GazeDeck Console, který byl vyvinut Mgr. Michaelou Vojtěchovskou pro sledování real-time eye-tracking dat ve webovém prostředí přímo pro hardware od společnosti Pupil Labs. Důvodem pro změnu byla také absence nutnosti kalibrace brýlí před každým použitím.

Mezi dílčí cíle práce patří praktické ověření a otestování funkčnosti ovládání mapového rozhraní a porovnání efektivity a uživatelské přívětivosti navrženého ovládání oproti tradičnímu způsobu ovládání mapy pomocí myši a klávesnice. Při tomto testování bude měřena časová náročnost hledání informací v mapě jednotlivých respondentů.

Výsledný zdrojový kód bude verzován technologií Git a publikován jako open-source skrze službu GitHub. Pro on-line hostování výsledné aplikace bude využito GitHub Pages. Dle zadání bude také vytvořen poster ve formátu A2 a samostatná webová stránka. Oba tyto materiály budou zobrazovat základní informace o diplomové práci, zejména její cíle, metodiku a výsledky.

Výsledky této práce umožní lépe porozumět limitům a benefitům bezdotykového ovládání v prostředí webových map. Poznatky plynoucí z testování najdou své uplatnění jako cenný metodický a technologický základ pro budoucí studie zabývající se aplikací eye-tracking zařízení nejen v oblasti geoinformatiky a kartografie, ale i v oblasti návrhu webových rozhraní obecně.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Interakce člověk-počítač

Studium interakce člověk-počítač (HCI, human-computer interaction) se zabývá způsobem, jakým lidé interagují s počítačem nebo skrze něj. Klade si za cíl analyzovat úlohy, které uživatelé vykonávají pomocí počítačů, a na základě těchto poznatků přispívat k návrhu uživatelsky přívětivějších, efektivnějších a spolehlivějších počítačových systémů (Sharples, 1996). Od rozšíření osobních počítačů na počátku 80. let 20. století se HCI postupně staly významnou oblastí, která se soustředí na studium lidského faktoru v technickém inženýrství. Dnes jsou výpočetní technologie zabudovány do běžných spotřebičů, kterými je člověk neustále obklopen. Studium HCI pokrývá široké spektrum podoborů, které se zaměřují nejen na způsoby interakce mezi člověkem a počítačem, ale obecně na interakci člověka s technologiemi jako takovými (Majaranta a kol., 2019).

Důležitým cílem návrhu uživatelských rozhraní je minimalizovat nároky na učení a umožnit uživatelům využívat jejich přirozené schopnosti a předchozí zkušenosti. Moderní přístupy k návrhu rozhraní se proto snaží o to, aby interakce byla co nejvíce intuitivní a aby uživatel nemusel vědomě přemýšlet o způsobu ovládání systému. Ideálním stavem je situace, kdy se rozhraní stává pro uživatele „neviditelným“ a jeho pozornost se soustředí především na vykonávaný úkol. Klíčovou roli v tomto kontextu hrají mentální modely uživatelů, jejichž respektování vede ke snížení kognitivní zátěže a ke zvýšení efektivity interakce (Wigdor a Wixon, 2011).

Aby tohoto stavu bylo dosaženo, jsou počítače vybavovány interaktivními prostředky, které uživatelům umožňují vytvářet, vybírat, orientovat, sledovat a přesouvat objekty na obrazovce. Tradičně jsou HCI zajišťovány kombinací zařízení, mezi něž patří zejména klávesnice, myš, dotykové pero či obrazovka, přičemž dotykové obrazovky představují formu přímé manipulace, kdy uživatel prostřednictvím dotyku prstu interaguje s objekty na zobrazovací ploše. V průběhu času však došlo k výraznému rozšíření dostupných interakčních metod a spektrum vstupních zařízení se rozšířilo také o trackbally, joysticky, digitalizační tablety nebo například eye-trackery (Sharples, 1996), pomocí nichž je možné sledovat pohyb očí a tím ovládat počítač, nikoli pouze pasivně vnímat obsah zobrazovaný na monitoru (Majaranta a kol., 2019). Pohled očí, kdy se v reálném čase shromažďují data pro odhad směru bodu pohledu uživatele, se stal široce používanou metodou HCI (Sharama a Abrol, 2013).

Aplikace založené na technikách HCI pomáhají rozvíjet a zlepšovat komunikaci mezi uživatelem a počítačem a jsou navrhovány tak, aby umožňovaly snadné, efektivní a účinné používání, šetřily čas a zvyšovaly uživatelský komfort. Na druhou stranu mají klasická zařízení svá omezení, zejména v tom, že vyžadují bezprostřední blízkost a fyzický kontakt uživatele, což může být ztěžující okolnost při dlouhodobém používání nebo v situacích, kdy není možné ovládat systém pomocí rukou (Sharma a Abrol, 2013). I přesto zůstává klávesnice hlavním prostředkem pro zadávání dat do počítače, ačkoli se její design mění, aby vyhovovala požadavkům na snížení únavy a prevenci poranění způsobených opakovaným přetěžováním (Sharples, 1996).

Vedle tradičních vstupních zařízení se objevují i další způsoby zadávání pokynů do výpočetních systémů. V případě nekonvenčních a nefyzických přístupů se jedná zejména o metody založené na analýze výrazů obličeje, gest rukou, polohy hlavy, řeči, emocí nebo pohledu očí. Tyto přístupy jsou využívány ke zvýšení přirozenosti interakce s počítačovými systémy a nacházejí uplatnění například v oblasti zpracování obrazu, manipulace ve

virtuálních prostředích, autorizace nebo v interaktivních real-time aplikacích (Sharma a Abrol, 2013).

Při návrhu uživatelských rozhraní hraje významnou roli také porozumění fungování lidského zraku a tomu, kam se soustředí vizuální pozornost uživatele. Duchowski (2017) navrhuje model pro tvorbu vizuálních displejů, který vychází z přirozených vlastností lidského vidění a z hlediska pozornosti. Podle tohoto modelu by mělo být prostorové rozlišení nejvyšší v místě, kam se člověk právě dívá, a směrem do okrajových částí zorného pole by mělo plynule klesat tak, aby odpovídalo přirozené zrakové ostrosti. Z toho vyplývá, že rozhraní by mělo reagovat především na oblast aktuálního pohledu uživatele, ale zároveň umožňovat orientaci i v okrajových částech zorného pole (Duchowski, 2017).

Snaha o co nepřirozenější propojení lidského vnímání s technologií vedla v posledních desetiletích k rozšíření rozhraní založených na přímé manipulaci. Významným milníkem se v tomto ohledu stal příchod dotykových obrazovek s uvedením iPhone v roce 2007. Důvodem byla vysoká obrazová kvalita těchto obrazovek, citlivá odezva a podpora vícedotykových gest (Kühn, 2024). Přestože dotyková rozhraní zaznamenala výrazný úspěch, nejsou bez omezení. Kritice čelí zejména kvůli absenci hmatové zpětné vazby a méně přirozenému ovládnutí ve srovnání s tradičními fyzickými prvky (Segan, 2009).

Alternativním přístupem je ovládnutí pohledem. To však nelze z hlediska efektivity a použitelnosti plně srovnávat s dotykovým ovládnutím (Gepner a kol., 2007), nicméně představuje vhodné rozšíření existujících interakčních možností. Stejně jako se dotykové obrazovky staly běžnou součástí zařízení, může i ovládnutí pohledem následovat podobnou cestu (Vojtechovska a kol., 2025).

## 2.2 Eye-tracking zařízení

Jak již bylo zmíněno výše, eye-tracker je přístroj určený k měření pohybů očí. Obecně lze rozlišit dva základní typy měření, a to měření pozice oka relativně k pozici hlavy a měření orientace oka v prostoru. V případě identifikace prvků ve vizuální scéně, například v grafických interaktivních aplikacích, se obvykle používá druhý typ měření, tedy orientace oka v prostoru (Duchowski, 2017).

Kiefer a Giannopoulos (2012) uvádějí, že eye-tracker je v HCI využíván dvěma způsoby. Buď jako nástroj pro analýzy použitelnosti, nebo může sloužit jako další vstupní zařízení, přistoupí-li se k datům o pohledu v reálném čase. Duchowski (2017) tyto dvě kategorie aplikace označuje jako diagnostické a interaktivní.

V diagnostické roli poskytuje eye-tracker objektivní a kvantitativní důkazy o vizuálních a pozornostních procesech uživatele. Pohyby očí jsou zaznamenávány za účelem zjištění vzorců pozornosti uživatele při sledování daného podnětu, přičemž zobrazovaný obsah na pohled uživatele nijak nereaguje. Eye-tracker je v tomto případě využíván nenápadně a data jsou analyzována až po ukončení experimentu. Shromažďují se souřadnice bodů pohledu, na jejichž základě lze analyzovat strategie pozornosti uživatele a odvodit vlastnosti podnětu z hlediska přitahování pozornosti. Diagnostické aplikace jsou tedy typicky offline a často se využívají například při hodnocení vzhledu webové stránky či umístění reklamy, kdy lze analyzovat, zda si uživatel daného prvku všiml.

Naopak, interaktivní aplikace využívající eye-tracker jako vstupní zařízení reagují na pohled uživatele v reálném čase. V praxi mohou tyto aplikace reagovat na pohled uživatele buď změnou svého vzhledu nebo přímým vyvoláním interakce, což umožňuje ovládnutí různých aspektů rozhraní přímo pohybem očí. Interaktivní techniky sledování pohybu očí jsou proto mimo jiné využitelné v oblasti HCI, kdy klasickým příkladem je použití souřadnic pohledu namísto kurzoru myši (Duchowski, 2017). I přesto nelze klasické vstupní modality

jako jsou myš a klávesnice plně nahradit eye-trackerem. Zvláště proto, že lidé využívají zrak především k získání informací, což by způsobilo problémy v případě, že by měl zároveň sloužit i k ovládní systému. Tento problém je nazýván jako „Midas touch“ (Midasův dotyk), kdy systém mylně interpretuje uživatelské soustředění na určité místo jako záměrnou interakci namísto pasivního prohlížení obsahu (Popelka, 2018).

Existuje několik typů eye-trackerů. Některé jsou připojené k počítačovým monitorům, jiné jsou připevněné k brýlím nebo speciálním helmám, které má uživatel po dobu testování na sobě. Princip fungování je obdobný, založený na infračerveném paprsku. Ten detekuje odraz světla od sítnice, jenž přispívá k centrování zornice, a odraz světla od rohovky (Chivu a kol., 2018), pomocí kterých přístroj určuje bod pohledu uživatele vzhledem k referenčnímu rámci obrazovky. Tato zařízení se stávají čím dál dostupnější a jsou nejvhodnější pro použití v interaktivních systémech. Zásadním požadavkem při návrhu grafických aplikací využívajících eye-tracking je správné mapování souřadnic pohledu uživatele na referenční rámec aplikačního prostředí. (Duchowski, 2017).

## 2.3 Pohyby očí

Pohyb očí není plynulý, ale skládá se z rychlých pohybů, mezi nimiž se vyskytují i krátké prodlevy (Rayner, 1998). Základními typy pohybů očí jsou fixace a sakády. Fixace popisují schopnost udržet oko zaměřené na určitý bod ve vizuálním poli. Fixace často trvají od několika milisekund až po několik sekund (Holmqvist a kol., 2011). Sakadické pohyby jsou naopak rychlé spojitě pohyby, které představují trajektorii mezi dvěma fixacemi. Vyznačují se velmi vysokým počátečním zrychlením, následným zpomalením a maximální rychlostí, která se mění v závislosti na amplitudě sakády (Young a Sheena, 1975).

Young a Sheena (1975) popisují i další typy očních pohybů. Mezi ně patří *sledovací pohyby* (smooth pursuit), které umožňují plynulé sledování pomalu se pohybujících objektů. Ačkoli jejich zahájení bývá volně řízené, jejich realizace je výrazně závislá na přítomnosti pohybujícího se vizuálního podnětu (například letícího letadla na obloze) a bez něj je nelze spolehlivě udržet. *Kompenzační* pohyby očí úzce souvisí se sledovacími pohyby a slouží ke stabilizaci obrazu během pohybu hlavy nebo trupu. *Vergenční* pohyby představují pohyby obou očí vůči sobě, tedy proti sobě nebo od sebe, za účelem zaostření na blízké nebo vzdálené objekty. Tyto pohyby jsou podstatně pomalejší než konjugované pohyby a jsou vyvolávány chybou zaostření či binokulární disparitou. *Miniaturní* pohyby očí zahrnují řadu pohybů, které mají nízké rozpětí a objevují se při snaze udržet fixaci na konkrétním bodě. Patří mezi ně zejména *drift*, tedy pomalý náhodný pohyb oka od fixačního bodu, a *mikrosakády*, což jsou malé, rychlé pohyby očí, které napomáhají udržení fixace. Tyto pohyby se u jedinců vyskytují spíše podél jedné preferované osy (Young a Sheena, 1975). Mikrosakády lze měřit nepřetržitě a kvůli nim se bod pohledu téměř nikdy nebude nacházet přesně na prvku, který je právě prohlížen (Kifer a Giannopoulos, 2012). V průběhu pilotního testování interaktivní webové mapy vyvíjené v rámci této diplomové práce byly přímo pozorovány určité nestability bodu pohledu, které se projevovaly při snaze fixovat zrak na konkrétní prvek. Tyto mimovolné drobné pohyby, které mohly být způsobeny například mikrosakádami, vedly k tomu, že se bod pohledu neustále pohyboval v blízkém okolí cíle. Přestože hlubší analýza původu a charakteru těchto mikropohybů nebyla předmětem dalšího zkoumání, z praktického hlediska bylo nutné, aby měly ovládací prvky mapy dostatečnou velikost, aby mohly být spolehlivě aktivovány i při kolísání přesnosti fixace. V rámci pozorování bylo rovněž zjištěno, že rozsah těchto mimovolných pohybů úzce souvisel s mírou otevřenosti očí respondenta.

## 2.4 Interakce založené na pohledu

Interakce založené na pohledu (GBIs – gaze-based interactions) se v posledních letech stávají stále běžnější součástí našich životů, ať už skrze veřejné displeje, videohry, chytré hodinky nebo filtry na sociálních sítích (Keskin a Kettunen, 2023). Tato HCI technika je také používána pro ovládání různých zařízení, například ovládání aplikací založených na grafickém uživatelském rozhraní pomocí pohledu nebo vývoj simulátorů pro počítačové hry (Sharma a Abrol, 2013). Vzhledem k tomu, že se přirozeně před samotným pohybem díváme na zamýšlený cíl, se interakce pohledem dobře sladí s již existující koordinací ovládání displeje v mozku. Pohled je proto atraktivní alternativní vstupní HCI modalitou s velkým potenciálem pro vytváření přirozených uživatelských rozhraní (Majaranta a kol., 2019; Shakil a kol., 2025).

### 2.4.1 Využití očních pohybů pro GBIs

Zvýšený zájem o využití pohledu jako alternativní vstupní modality souvisí s nástupem dostupných a relativně přesných eye-tracking přístrojů na trh (Shakil a kol., 2025). Interakce uživatele s počítačem může být popsána různými, funkčně odlišnými, způsoby. V mnoha případech je založena na analýze fixací, které jsou popsány souřadnicemi x a y spolu s časem jejich začátku a dobou trvání (Harezlak a kol., 2021).

Jedním z nejrozšířenějších způsobů ovládání je metoda výběru pohledem, která vychází z přirozeného lidského chování, kdy člověk nejprve zaměří svůj pohled na objekt svého zájmu. V tomto typu interakce je kurzor myši na obrazovce nahrazen pozicí oka a doba fixace je použita pro aktivaci konkrétní akce. Tou často bývá simulace kliknutí myší nebo jí může být vyvolání nabídky dalších možností, kterou uživatel opět potvrzuje svým pohledem (Harezlak a kol., 2021; Zeng a kol., 2023). S tímto typem interakce je spojován problém Midasova dotyku. Pro jeho minimalizaci je pro výběr prvku nastavována časová prahová hodnota („dwell time“), po jejímž uplynutí je objekt vybrán nebo je spuštěna požadovaná akce. Další výzvou je nutnost dostatečné přesnosti eye-trackeru nezbytné pro správnou identifikaci fixovaného objektu na obrazovce (Zeng a kol., 2023).

Alternativou k předešlé možnosti je výběr objektu pomocí mrknutí, tedy zavření jednoho či obou očí. Vzhledem k tomu, že mrkání je pro člověka často nevědomé, je potřeba rozlišit mimovolní mrknutí od vědomé akce. Pro eliminaci nechtěných spouštění akcí je nastavována časová hranice, po kterou je zavření oka či očí považováno za úmyslné. Stejně jako u interakce zaměřené na setrvání pohledu je i v tomto případě kurzor myši nahrazen pozicí očí na obrazovce.

Dalším typem interakce jsou oční gesta, která na rozdíl od předešlých využívají pro aktivaci sakády. Gesta lze chápat jako posloupnost úmyslných sakád, jejichž trajektorie jsou přiřazeny ke konkrétním interakčním pokynům. Specifická akce je spuštěna poté, co uživatel správně provede definovanou sekvenci sakád. Výhodou tohoto přístupu je schopnost lépe rozlišit úmyslné a neúmyslné interakce a menší závislost na přesné poloze bodu pohledu, protože důležitá je především relativní pozice mezi počátkem a koncovým bodem sakády. Na druhou stranu nevýhodou je nutnost naučit se a zapamatovat si jednotlivé sekvence iniciující danou akci, což omezuje využití této metody například na veřejných displejích (Harezlak a kol., 2021; Zeng a kol., 2023).

Je však třeba zdůraznit, že skutečné interakce založené na pohledu obvykle zahrnují kombinaci více typů očních pohybů a neomezují se pouze na jeden konkrétní mechanismus (Majaranta a kol., 2019). Tabulka 1, zpracovaná podle Majaranta a kol. (2019), shrnuje způsoby využití očních pohybů v HCI společně s jejich výhodami a omezeními.

Tabulka 1 Typy očních pohybů v interakcích člověk-počítač (zpracováno dle Majaranta a kol., 2019)

<b>Fixace a výběr setrváním pohledu</b>		
<i>Kategorie</i>	<i>Výhody</i>	<i>Problémy s omezeními</i>
Fixní prahová hodnota doby setrvání pohledu	Snadné použití	Nalezení nejlepší prahové hodnoty
Nastavitelná prahová hodnota doby setrvání pohledu	Lze přizpůsobit uživateli a úkolu	Příliš časté úpravy mohou ovlivnit rytmus interakce
Výběr bez setrvání pohledu	Potenciál pro rychlou interakci	Omezeno na zadávání textu
<b>Sakády a gesta pohledem</b>		
<i>Počet tahů</i>	<i>Výhody</i>	<i>Problémy s omezeními</i>
Jednoduchá gesta (jeden nebo několik tahů)	Rychlost	Lze zaměnit s přirozenými pohyby očí
Složitá gesta	Nedají se zaměnit s přirozenými pohyby očí	Vyžadují učení, mohou být náchylná k chybám
Nepřetržitě ukazování	Užitečné pro úlohy zoomování a řízení	Není užitečné pro jiné úkoly
<b>Umístění tahů</b>		
V pevné části obrazovky	Nedají se zaměnit s prohlížením obrazovky	Vyžadují přesun pozornosti z cíle na ovládání
Kdekoli na obrazovce	Lze použít s různými trackery	Nutno odlišit od přirozených pohybů očí
Mimo obrazovku	Lze použít s různými zobrazovacími zařízeními	Omezená sada příkazů
<b>Méně používané nebo novější metody</b>		
<i>Kategorie</i>	<i>Výhody</i>	<i>Problémy s omezeními</i>
Plynulé sledování	Nevyžaduje kalibraci; Lze využít pro kalibraci; Vhodné pro všudypřítomné použití eye-trackingu	Pomalejší než tradiční techniky
Dobrovolná konvergence	Robustní; nedochází k ní náhodně	Může být pro uživatele nepraktická
Dobrovolné rozšíření zornic		Není možné pro každého uživatele; Funguje pouze na krátké okamžiky; Ovlivněno (měnícími se) světelnými podmínkami
Dobrovolné mrkání a zamrkání	Lze snadno oddělit od přirozeného mrkání; Lze použít společně s tradičními metodami	Může fungovat pouze jako přepínač
Gesta hlavou založená na pohledu	Jednoduchá a intuitivní metoda výběru; Umožňuje udržet pohled na cíli během interakce	Vyžaduje schopnost pohybovat hlavou (nevhodné pro osoby s motorickým postižením)

## 2.4.2 Možnosti a limity využití zraku jako vstupní modality

Základní princip GBI spočívá v tom, že uživatel zadává příkaz jednoduše tím, že se podívá na objekt svého zájmu, načež může dojít k vyvolání akce nebo adaptaci zobrazovaného obsahu. Tento způsob interakce umožňuje bezdotykové, a tedy i hygienické zadávání vstupů s minimální fyzickou námahou, což může být užitečné například ve veřejných prostorech (Pfeuffer a kol., 2021). Hlavní funkcí systémů pro sledování pohybu očí je jednoznačně rozpoznávání lidské činnosti, výrazů obličeje, ukazování, selekce a aktivace příkazů a nacházejí uplatnění napříč řadou oborů, ať už se jedná o sledování chování zákazníků obchodu, vývojovou psychologii či neurovědu (Sharma a Abrol, 2013).

Klíčovou překážkou v GBI je nedostatečná přesnost (accuracy) a preciznost (precision). Přesnost značí posun mezi zamýšleným cílem a skutečným bodem pohledu, zatímco preciznost měří konzistenci bodů pohledu během opakovaných měření. Tyto limity vycházejí jak z omezení přístroje, tak i z fyziologických vlastností očí uživatele (Shakil a kol., 2025). Přesnost závisí mimo jiné na použitém zařízení, relativní poloze eye-trackeru vůči hlavě, fyziologii oka, kvalitě kalibrace a světelných podmínkách v prostředí záznamu (Kiefer a Giannopoulos, 2012). Velkou výzvou je také udržení kvality dat pohledu zejména v exteriéru nebo u mobilních zařízení (Majaranta a kol., 2019). V rámci realizovaného testování se potvrdilo, že fyziologie oka hraje zásadní roli. U respondentů s přirozeně přivřenými víčky vykazoval systém nižší stabilitu sledování bodů pohledu. Pro dosažení optimální přesnosti byli někteří uživatelé nuceni oči více otevřít, což vedlo k rychlejší únavě, zvýšenému slzení a celkovému diskomfortu. Důležitým faktorem byla také stabilita usazení eye-tracking brýlí. I mírný posun obrouček z kořenu nosu v průběhu experimentu negativně ovlivňoval výslednou kvalitu dat.

Stejný eye-tracker, který je využíván pro výzkumné účely, lze použít i jako vstupní zařízení pro interakci mezi uživatelem a systémem, avšak je nutné splnit určité dodatečné požadavky. Nestačí pouze přenášet data do počítače v reálném čase, ale také je nutné data okamžitě analyzovat tak, aby aplikace mohla bezprostředně reagovat na pohyb očí uživatele. Požadovaná kvalita a úroveň detailu dat se přitom liší podle konkrétní aplikace a ne vždy je nezbytná vysoká přesnost určení polohy pohledu. V některých případech je dostačující jen informace o detekci očí uživatele. Díky tomu je možné využít i levnější a méně přesné eye-trackery (Majaranta a kol., 2019).

V rámci HCI studií se rozlišují dva typy GBI, a to implicitní (pasivní) a explicitní (aktivní). V případě explicitní interakce uživatel záměrně využívá pohled jako ukazatel k vyvolání určité akce, a to například prostřednictvím fixace nebo plynulého sledování objektu (Rudi a kol., 2019; Keskin a Kettunen, 2023). Příkladem tohoto typu interakcí je ovládání rozhraní pomocí pohybů očí pro akce, jako je přiblížení, posun či výběr. Ve skutečnosti existují systémy s rozhraními založenými na pohybu očí, které usnadňují interakci v reálném čase (Keskin a Kettunen, 2023). Implicitní GBIs naopak zaznamenávají a interpretují směr pohledu uživatele za účelem odhadnutí jeho informačních potřeb a na základě těchto vstupů přizpůsobují rozhraní (Rudi a kol., 2019; Keskin a Kettunen, 2023). Tento přístup je využíván zejména k vytváření inteligentních systémů, ve kterých spolu stroje a lidé pracují za účelem dosažení společného cíle (Keskin a Kettunen, 2023).

Díky technologickému pokroku v oblasti sledování pohledu uživatele je dnes využití zraku jako vstupní modality výrazně jednodušší. Současné systémy umožňují uživateli přirozený pohyb hlavy i těla v určitém rozsahu, na rozdíl od 90. let, kdy bylo nutné setrvat téměř nehybně. Eye-trackery jsou často integrovány přímo do rámu obrazovky a zároveň bývají spojené s videokamerami, které tak umožňují okamžitou detekci směru pohledu uživatele, polohy hlavy a její orientace. Je-li řeč o eye-trackerech umístěných na hlavě

uživatelé, staly se méně rušivými. Neomezují mobilitu uživatelů a jejich velikost a hmotnost se snížily tolik, že je lze připevnit například na brýle. Také kalibrace je mnohem jednodušší a rychlejší. Do budoucna se dá očekávat, že i přes značné výzkumné úsilí budou detekce a sledování pohledu spolehlivě rozpoznávány pomocí téměř neviditelných nositelných zařízení s širším praktickým využitím (Gepner a kol., 2007).

Použitelnost pohledu jako doplňující vstupní modalita u zdravých uživatelů není dosud předmětem širšího výzkumu. Mnohem častější jsou studie zabývající se hodnocením užitečnosti pohledu jako HCI modalita pro uživatele počítačů s vážným motorickým postižením (Bates a Istance, 2004) nebo pro uživatele, kteří se zabývají náročnými manuálními činnostmi, jako jsou například piloti v kokpitech (Hatfield a kol., 1996; Rudi a kol., 2019). Přestože je ovládání pomocí pohledu přirozené, jednoduché a fyzicky nenáročné, má i své nevýhody. Pohled je snadno ovlivnitelný okolními podněty, což může při dlouhodobém používání působit nepřírodně a může vyžadovat určitou praxi, a to zejména u osob s motorickým postižením (Majaranta a kol., 2019).

V oblasti asistenčních technologií představuje rozhraní využívající sledování pohybu očí zásadní přínos zejména pro osoby s motorickým postižením, které nemohou ovládat počítač pomocí rukou. Pro komunikaci těchto uživatelů lze využít technologie eye-trackingu, a to nejčastěji s použitím pohledu jako metody výběru (Deepika a Murugesan, 2015). Sledování pohybu očí přitom může být realizováno nejen pomocí eye-trackeru umístěného pod monitorem (Hornof a Cavender, 2005) nebo integrovaného do brýlí (Deepika a Murugesan, 2015), ale i prostřednictvím běžné kamery v mobilním zařízení (Zhang a kol., 2017).

Deepika a Murugesan (2015) se ve své studii zaměřili na vývoj praktického eye-tracking systému, který by pomáhal lidem s motorickým postižením. Cílem bylo vytvořit technologii umožňující ovládání počítače pohybem očí, přičemž jako metodu výběru sloužilo mrkání. Tento systém usnadnil intuitivní a efektivní ovládání počítače pro uživatele se zdravotním postižením a zdůraznil potenciál GBIs pro zvýšení nezávislosti a komunikace osob s motorickým postižením.

V jiné studii se Galante a Menezes (2012) zaměřili konkrétně na uživatele s dětskou mozkovou obrnou, pro které vyvinuli a vyhodnotili komunikační eye-tracking systém. Výsledky výzkumu ukázaly, že i přes mimovolné pohyby hlavy byli uživatelé schopni efektivně vybírat symboly na speciální komunikační tabuli, což potvrdilo potenciál navrženého systému. Studie zároveň položila základy pro další vylepšení a přizpůsobení této technologie pro mobilní zařízení a aplikace integrované do invalidních vozíků.

Zhang a kol. (2017) ve své studii vyvinuli systém pro chytré mobilní telefony využívající vestavěné kamery k rozpoznání očních gest v reálném čase, čímž dosáhli zlepšení rychlosti komunikace i spokojenosti uživatelů. Systém je zároveň odolný vůči různým světelným podmínkám a díky své přenositelnosti představuje cenově dostupnou a praktickou alternativu či doplněk ke stávajícím řešením sledování pohybu očí pro osoby s motorickým postižením.

Dalším příkladem využití GBIs je studie Hornofa a Cavendera (2005), kteří vytvořili a otestovali software pro kreslení na obrazovce pomocí pohybu očí. Bylo prokázáno, že tento systém může být účinným nástrojem nejen pro kreativní a rozvojové aktivity osob s motorickým postižením, ale i pro širší skupinu uživatelů. Praktická část výzkumu tedy potvrdila, že sledování pohybu očí a GBIs mohou efektivně podporovat i uměleckou tvorbu.

Sledování pohybů očí je v kartografii tradičně využíváno k analýze vizuální pozornosti a kognitivních procesů při práci s mapami či jinými geovizualizacemi. Porozumění tomu, jak lidé vnímají a čtou, je skutečně nápomocné pro navrhování lepších mapových výstupů

a dalších prostorových vizualizací. Ačkoli lze navrhnout interaktivní mapy reagující na pohled, které od uživatelů vyžadují méně kognitivního úsilí a tím zvyšují úroveň interakce, nebo systémy automaticky přizpůsobující zobrazení mapy na základě vizuální pozornosti uživatele při interakci s mapou (Keskin a Kettunen, 2023), existuje zatím jen omezené množství studií zabývajících se sledováním pohybu očí jako nástroje pro přímou interakci v bezkontaktním ovládní mapových aplikací. Ovládní zrakem představuje perspektivní alternativu k běžně používaným vstupním modalitám, přičemž v některých případech může překonávat některá jejich omezení a přinášet tak výhody (Vojtechovska, 2024).

### **2.4.3 Multimodální interakce**

Jak již bylo uvedeno, systémy založené výhradně na ovládní pohledem bývají náchylné k nežádoucím aktivacím a mohou u uživatelů vést ke zvýšené únavě. Ve výzkumné oblasti GBIs se naopak jako přesnější, robustnější a uživatelsky lépe ovladatelné ukazují multimodální přístupy, které integrují pohled s další vstupní modalitou (Vojtechovska a kol., 2025), například s dotykem na tabletu (Radiah a kol., 2019) nebo kolečkem na počítačové myši (Stellmach a Dachsel, 2012). Tyto teoretické poznatky se přímo potvrdily i během hlavního uživatelského testování v rámci této práce. Respondenti hodnotili jako použitelnější multimodální způsob ovládní kombinující pohled s klikáním myši oproti ovládní mapy výhradně pomocí pohledu. Časové výsledky testování zároveň naznačily, že multimodální způsob interakce v určitých úlohách dosahoval téměř srovnatelné rychlosti jako ovládní výhradně pomocí myši. Problematice GBIs a multimodálních přístupů v geovizualizacích se podrobně věnuje studie Vojtechovske a kol. (2025), která blíže analyzuje celkem 26 vybraných studií.

Možnosti multimodální interakce nejsou omezeny pouze na kombinaci pohledu s tradičními vstupními zařízeními, ale zahrnují i další alternativní mechanismy. Využití nohou jako doplňkové modality se věnují autoři Klamka a kol. (2015), kteří ve své studii zkoumali kombinaci zrakového vstupu pro určení směru s ovládním rychlosti pohybu mapy pomocí nožních pedálů. Autoři uvádějí, že tento přístup umožňuje plynulé a hands-free ovládní geovizualizací. Zároveň dospěli k závěru, že tato kombinace zrakové a nožní interakce představuje perspektivní a uživatelsky příznivý způsob navigace v informačních prostorech, který je srovnatelný s klasickým ovládním myši a zároveň nabízí nové možnosti rozšíření interakce.

Další alternativu k manuálnímu ovládní studovali ve své práci Gepner a kol. (2007). Autoři zkombinovali zrak s hlasovým ovládním zejména v prostředích vyžadujících práci s velkými displeji či virtuální realitou. Zatímco sledování pohledu sloužilo k přesnému určení cíle posunu, hlasové příkazy sloužily k potvrzení výběru nebo ke změně měřítka mapy. Výsledky studie ukazují, že tato multimodální kombinace umožňuje efektivní navigaci, přičemž využití pohledu zvyšuje rychlost ukazování a uvolňuje ruce pro další úkony. Autoři však upozorňují na nutnost vhodného designu rozhraní, který dokáže spolehlivě odlišit záměrné hlasové povely od běžné řeči.

Specifický přístup k multimodální interakci je využití pohybu hlavy jako spouštěcího mechanismu v prostředí virtuální reality. Tomu se ve své studii věnovali Zhang a kol. (2022). V jejich systému sloužil výrazný náklon hlavy uživatele k vyvolání dynamického ovládacího menu, které se zobrazilo v aktuálním zorném poli. Následná interakce s nabídkou a samotné ovládní mapových funkcí (posun, rotace, změna měřítka) již probíhala prostřednictvím fixace pohledu. Toto zapojení gest hlavou umožňovalo efektivně spravovat interaktivní prvky v rozsáhlých 3D scénách, aniž by docházelo k vizuálnímu zahlcení hlavního mapového pole statickými ovládacími prvky.

## 2.5 Systémový design

Norman (1988) ve své publikaci definuje sedm základních principů designu, které přispívají k lepší použitelnosti systému. Patří mezi ně *objevitelnost*, tedy schopnost uživatele snadno rozpoznat dostupné akce, a *zpětná vazba*, která uživatele průběžně informuje o výsledcích jeho činnosti. Důležitým prvkem je *konceptní model*, jenž pomáhá uživateli porozumět fungování systému, dále *dostupnost* a *signifikátory*, které jasně naznačují možnosti interakce. *Mapování* zajišťuje přirozený vztah mezi ovládacími prvky a jejich funkcemi, zatímco *omezení* vedou uživatele ke správným akcím a pomáhají předcházet chybám (Norman, 1988).

Vzhledem k tomu, že oči slouží primárně k vnímání informací, je důležité, aby při návrhu systému ovládaného pohledem byl uživatel jasně informován o stavu a reakci systému na jeho pohled. Vhodně navržená zpětná vazba pomáhá předcházet problému Midasova dotyku a zároveň zvyšuje výkonnost i celkovou spokojenost uživatele. V první řadě by měl mít uživatel možnost snadno rozpoznat, zda systém správně sleduje jeho pohled. Bez odpovídající zpětné vazby by uživatel nevěděl, zda eye-tracker správně rozpoznává sledovaný cíl. Nejčastější formou zpětné vazby je zobrazení kurzoru nebo zvýraznění sledovaného objektu. U interakcí založených na setrvání pohledu je navíc vhodné informovat uživatele o zbývajícím čase do spuštění akce. Tato zpětná vazba může uživateli pomoci udržet pozornost na daném objektu po dostatečně dlouhou dobu, aby byla interakce úspěšně provedena. Příkladem takového řešení může být vizuální indikátor ve formě načítacího kolečka nebo lišty. Kromě vizuální zpětné vazby lze využít také haptickou, zvukovou nebo slovní formu odezvy. V aplikacích vyžadujících pozornost je potřeba nalézt rovnováhu mezi zpětnou vazbou, která neruší, ale zároveň informuje uživatele o stavu systému (Majaranta a kol., 2019).

Tyto obecné principy designu nabývají na významu také v prostředí geovizuualizací, kde je nutné propojit ovládání prvků s vnímáním mapového obsahu. Vojtechovska a kol. (2025) v této souvislosti zdůrazňují roli interakčních zón, které v mapovém okně fungují jako virtuální tlačítka aktivovaná po stanoveném čase fixace (*dwelling time*). Správné nastavení vizuální odezvy je zásadní pro plynulost navigace (například posun mapy či změna měřítko) a minimalizaci nechtěných aktivací. Autoři rovněž doporučují optimalizaci velikosti a uspořádání interakčních zón tak, aby respektovaly přirozený vizuální tok a podporovaly intuitivní používání systému.

## 2.6 Webová kartografie

V několika posledních letech došlo k výraznému rozvoji digitálních a online technologií, který zásadně ovlivnil také oblast kartografie a geoinformačních technologií obecně (Veendendaal a kol., 2017). První mapy se na webu objevily již v roce 1993 s nástupem počítačů podporujících grafiku. Statické mapy byly skenovány a nahrávány na internet, často ve špatné kvalitě. S postupným vývojem internetu se webová kartografie rozvíjela velmi rychle (Anthamatten, 2021).

Webové prostředí posunulo mapování a geoinformační systémy na vyšší úroveň zejména díky větší dostupnosti, interaktivitě a možnosti kolaborace. Geoprostorová data a funkce jsou často poskytovány prostřednictvím webových služeb, které lze dále využívat pomocí aplikačních rozhraní. Koncovými uživateli jsou potom nejenom lidé, ale také aplikační softwarové programy, které mohou využívat a konzumovat geoprostorové informace (Veendendaal a kol. 2017).

Zásadní vlastností, která odlišuje webovou kartografii od tradičních statických map, je interaktivita (Anthamatten, 2021). Zatímco u tištěných map je interakce s uživatelem

omezená, digitální a webové mapy nabízejí mnoho možností interakce (Popelka a kol., 2022). Uživatel může s webovou mapou aktivně pracovat, například měnit měřítko, posouvat mapu, přepínat vrstvy nebo upravovat zobrazovaná data (Anthamatten, 2021). V běžných aplikacích jsou tyto interakce realizovány prostřednictvím tradičních vstupních modalit. V případě ovládání mapy pomocí eye-trackeru je však nutné tradiční způsoby interakce převést do podoby bezkontaktní (Nétek, 2011). Vojtechovska a kol. (2025) uvádí, že mezi nejčastější způsoby ovládání pohledem patří posun mapy (*panning*) vyvolaný fixací u okrajů obrazovky, změna měřítka (*zoomování*) na základě fixace na konkrétní tlačítka či objekty mapy, dále selekce mapových prvků pomocí setrvání pohledu či aktivace funkcí pomocí očních gest nebo mrkáním. Klíčovým aspektem GBIs v kartografii je uspořádání interakčních prvků tak, aby nezakrývaly důležité geografické informace a zároveň podporovaly plynulý a intuitivní zážitek z interakce (Vojtechovska a kol., 2025).

### 3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola poskytuje ucelený přehled aplikovaných metod, softwarových nástrojů, technologií a datových sad využitých při řešení diplomové práce. Popsán je také základní postup vývoje webové mapy ovládané pohybem očí a zpracování diplomové práce jako celku. Záměrem je stručná charakteristika použitých postupů. Detailní implementační řešení je rozebráno v následující kapitole.

#### Použité metody

Práce byla zahájena studiem odborné literatury a vědeckých studií týkajících se možnosti využití eye-trackingu jako vstupní modality webových map a HCI obecně. V rešerši byl kladen důraz na získání poznatků týkajících se vzhledu uživatelského rozhraní webových map a mapových aplikací, které následně sloužily jako základ pro vývoj vlastní webové mapy. V práci bylo využito metody komparace, pomocí které jsou v závěru porovnávány dvě různé modality ovládání (manuální pomocí myši a pomocí pohledu (gaze)) webové mapy v rámci navržených mapových variant.

Práce se opírá o empirické metody, zejména o metodu řízeného experimentu. V rámci testovací platformy byla záměrně manipulována nezávislá proměnná (způsob ovládání mapy) za účelem sledování a měření jejího vlivu na závislé proměnné, kterými byly primárně objektivní časová náročnost úkolu a sekundárně subjektivní uživatelský prožitek. Pro minimalizaci nežádoucích vnějších vlivů na experiment byl navržen jednotný testovací scénář doplněný o tréninkovou webovou mapu eliminující efekt učení na samotné měření. Experiment byl doplněn o metodu dotazníkového šetření využitím standardizovaného dotazníku User Experience Questionnaire (dále UEQ) ve verzi 14 (dostupné z: <https://www.ueq-online.org/>), který umožnil kvantitativní statistické vyhodnocení subjektivních pocitů uživatelů. Pro kvalitativní část výzkumu byl po skončení experimentu veden neformální rozhovor s cílem zjistit pocity s ovládáním webové mapy pomocí pohybu očí.

Z hlediska softwarového inženýrství byl pro vývoj zvolen agilní (iterativní) přístup. Ten umožnil průběžné testování kritických funkcionalit ještě před nasazením mapového obsahu.

#### Použité technologie a programy

Vývojová část práce byla realizována v open-source editoru Visual Studio Code (dále VS Code), který obsahuje podporu pro Git a GitHub. Zdrojový kód byl zálohován ve vzdáleném repozitáři na platformě GitHub a po celou dobu vývoje byl verzován technologií Git. Tento postup je vhodný zejména pro sledování historie změn v kódu a umožňuje se k nim zpětně vrátit v případě nečekaného problému. K publikování produkční verze testovací platformy posloužila služba GitHub Pages. Výsledný produkt je šířen pod copyleftovou licencí GNU General Public License, která je sepsaná v textovém dokumentu. Základní dokumentace repozitáře byla vytvořena ve značkovacím jazyce Markdown (dále MD).

Architektura webové aplikace je postavena na standardech HTML5 (HyperText Markup Language), CSS3 (Cascading Style Sheets) a jazyce JavaScript (dále JS) pro interaktivní ovládání webové stránky. Samotné vykreslování mapových prvků zajišťuje open-source knihovna MapLibre GL JS (verze 4.7.1), která využívá technologii WebGL (Graphics Library) pro efektivní hardwarovou akceleraci vektorových dat. Jako podkladová vrstva byly využity vektorové dlaždice projektu VersaTiles, které představují open-source řešení pro distribuci mapových dat.

Zcela zásadní pro tuto práci je použitý hardware a aplikační middleware. Detekci pohybu očí zajišťují eye-trackingové brýle Pupil Neon. Brýle disponují dvěma infračervenými kamerami pro sledování očí se snímkovací frekvencí 200 Hz. Klíčové je propojení brýlí s mobilním zařízením skrze aplikaci Neon Companion App. Komunikaci mezi hardwarem a samotnou webovou mapou v reálném čase zajišťuje systém GazeDeck Console poskytnutý autorkou nástroje Mgr. Michaelou Vojtěchovskou. Systém ke kalibraci plochy monitoru využívá konfigurační soubor YAML (Yet Another Markup Language) a vizuální značky tzv. AprilTagy.

Pro ověření funkčnosti a stability vyvinuté testovací platformy v různých webových prohlížečích byla využita bezplatná verze online webové aplikace Browserling (dostupné z: <https://www.browserling.com/>). Pro textovou a grafickou část práce byly použity programy z balíku Microsoft Office 2019 pod univerzitní licenci a webová aplikace Canva. Standardizovaný dotazník UEQ byl vytvořen skrze Google formuláře s automatickým zaznamenáváním odpovědi do Google tabulek.

### **Použitá data**

Pro potřeby práce nebyla sbírána žádná vlastní prostorová data. Použitá data byla stažena z Open Street Map (dále OSM) prostřednictvím pluginu QuickOSM přímo do programu QGIS (verze 3.34). Staženo bylo sedm datových vrstev ze zájmového území města Olomouce. Tematicky se jedná o vrstvy budov, kaváren, restaurací, parkovišť, parků, cyklostezek a pěších zón. Tyto vrstvy byly zvoleny cíleně pro zajištění variability geometrie a rozdílné datové náročnosti. Pro tréninkovou mapu byla použita datová sada zobrazující budovy UP, poskytnutá katedrou geoinformatiky UP.

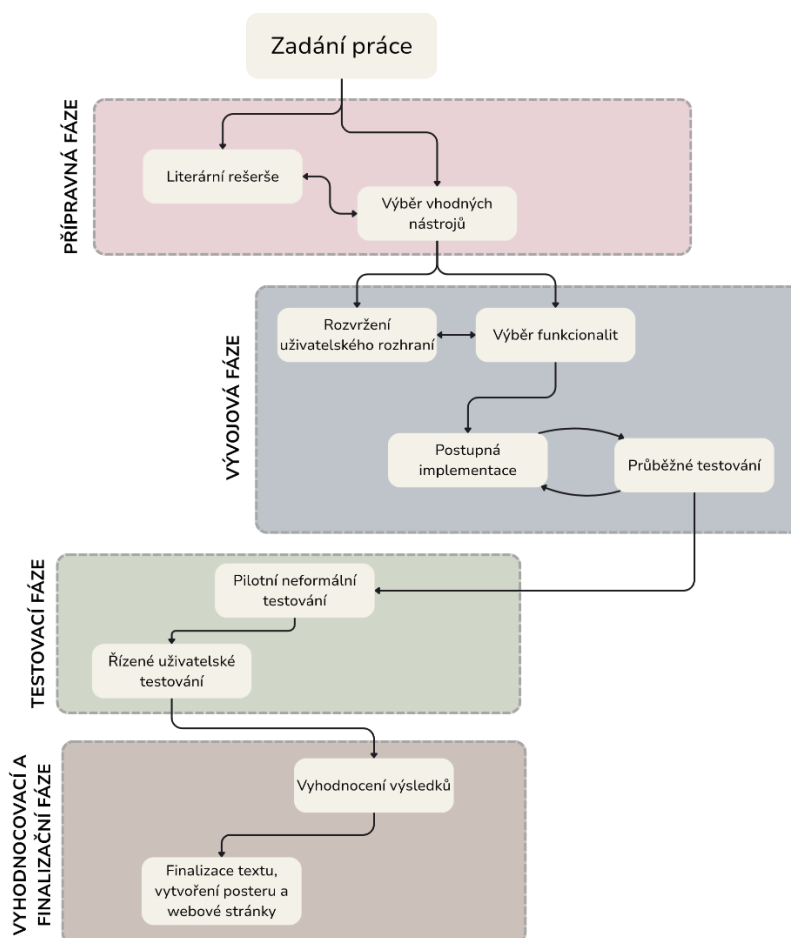
Pro potřeby webové vizualizace byla všechna data, včetně vrstvy univerzitních budov, z prostředí QGIS exportována ve formátu GeoJSON (JavaScript Object Notation) a v souřadnicovém systému WGS84 (World Geodetic System 1984; EPSG: 4326), se kterým knihovna Maplibre GL JS pracuje.

### **Použité generativní umělé inteligence**

Při zpracování diplomové práce byly využity nástroje generativní umělé inteligence, které sloužily jako podpora při vývojových a textových úpravách. Pro technickou konzultaci a dílčí korekce zdrojového kódu byly využity modely Claude a GitHub Copilot, který byl integrován přímo ve vývojovém prostředí VS Code jako asistent pro doplňování kódu. Pro stylistickou korekci textové části práce byl využit model Gemini se studentskou licenci, případně ChatGPT. Veškeré výstupy generované těmito nástroji byly revidovány. Nástroje umělé inteligence nebyly využity k interpretaci výsledků ani k formování závěrů práce.

### **Postup zpracování**

Vypracování diplomové práce probíhalo v několika navazujících krocích znázorněných na Obrázek 1, které lze rozdělit do čtyř logicky navazujících fází.



Obrázek 1 Postup zpracování diplomové práce.

Přípravná fáze byla zahájena studiem odborné literatury a rešerší uživatelských rozhraní již existujících webových map. Následovala volba vhodných technologických nástrojů. V této fázi byl otestován prototyp webové mapy nad mapovou knihovnou Leaflet, avšak kvůli výkonnostním požadavkům na vykreslování větších datových sad bylo následně přistoupeno k nasazení výkonnější knihovny MapLibre GL JS.

Vývojová fáze zahrnovala iterativní programování interaktivního prostředí a návrh specifických interakčních mechanismů pro ovládání pohledem. Tento proces zahrnoval definování logiky výběru objektů na základě času fixace (*dwell time*) a stanovení algoritmů pro plynulý posun a zoomování mapy. Problém Midasova dotyku byl řešen skrze specifické rozvržení interakčních zón, které umožnilo oddělit fázi prohlížení mapy od fáze aktivní navigace. Nejprve byla připojena mapová knihovna MapLibre GL JS, poté byly definovány funkční okrajové zóny pro posun mapy a centrální zóna pro změnu měřítka. Následně proběhla integrace prostorových dat a tvorba dynamické legendy, pomocí které lze zvýraznit vrstvy v mapovém okně. Stěžejní byla implementace samotného propojení se systémem GazeDeck skrze komunikační WebSocket (dále WS) protokol. Vyvinuto bylo celkem pět webových map, čtyři testovací a jedna trénovací verze. Testovací varianty, zobrazující data z OSM, kombinují prvky manuálního ovládání (myš, klávesnice) a ovládání pohledem (*gaze*). Trénovací verze, která vykresluje data o budovách UP, využívá pouze ovládání pomocí pohledu (*gaze-only*) a slouží k seznámení respondenta se způsobem ovládání mapy, a tím vede k minimalizaci efektu učení na samotném testování. Ze všech pěti variant byla vyvinuta komplexní testovací platforma, která zároveň automaticky sbírá časové logy přímo ve webové stránce.

V testovací fázi bylo po úvodním interním ladění aplikace provedeno neformální pilotní testování na malém vzorku respondentů pro ověření chodu všech funkcionalit a zjištění, zda je ovládání webové mapy srozumitelné. Následně bylo v březnu 2026 realizováno hlavní řízené uživatelské testování na 13 participantech, které zahrnovalo průchod všemi pěti webovými mapami, neformální rozhovor a vyplnění standardizovaného dotazníku UEQ.

Poslední etapou byla vyhodnocovací a finalizační fáze. Jeden z posledních kroků zahrnoval zpracování naměřených dat, vyhodnocení dotazníku a komparaci obou způsobů ovládání. Finální fáze se soustředila na sepsání metodické části diplomové práce a vytvoření doprovodných grafických materiálů v podobě posteru a webové stránky.

## 4 VÝVOJ WEBOVÉ MAPY OVLÁDANÉ POHYBEM OČÍ

### 4.1 Architektura systému a hardwarové vybavení

Pro ovládání mapy pohledem bylo po odborné konzultaci s vedoucím práce upuštěno od stacionárního eye-trackeru umístěného pod monitorem a byla využita modernější nositelná technologie, konkrétně eye-trackingové brýle Pupil Neon. Hlavní výhodou tohoto řešení je vysoká mobilita a fakt, že zařízení nevyžaduje před každým spuštěním kalibraci. Zpracování obrazu a detekce pohledu probíhalo prostřednictvím systému GazeDeck Console vyvinutého Mgr. Michaelou Vojtěchovskou. Pro přesnou detekci plochy monitoru ve scéně systém využívá AprilTagy ve formátu PNG, které GazeDeck generuje společně s YAML konfiguračním souborem do cílové složky, kterou je pro správné fungování kódu nutné pojmenovat *my\_screen*. Pro zajištění flexibility a snazšího použití webové mapy i při vygenerování jiného počtu AprilTagů byl implementován automatizační JS kód (*tagsloader.js*). Tento skript využívá knihovnu *js-yaml* k parsování konfiguračního souboru a následně dynamicky načítá obrázky tagů, které umísťuje na obrazovku jako fixní HTML elementy. Skript navíc obsahuje bezpečnostní podmínku, která tagy automaticky přichytává k okraji obrazovky, pokud se nacházejí ve vzdálenosti menší než 5% od okraje displeje. Kamera na eye-trackingových brýlích tyto tagy nepřetržitě snímá, díky čemuž dokáže mapovat body pohledu uživatele na 2D plochu monitoru. Systém následně vrací relativní souřadnice v rozmezí hodnot 0 až 1, přičemž levý horní roh obrazovky je definován souřadnicemi (0,0) a pravý dolní roh (1,1).

Z hlediska síťové architektury probíhá přenos dat ve dvou krocích. Eye-trackingové brýle, spárované s mobilním zařízením přes aplikaci Neon Companion App, sdílejí stejnou lokální bezdrátovou síť s řídicím počítačem. Z praktického hlediska nelze využít standardní zabezpečené sítě, například univerzitní síť Eduroam, neboť jejich bezpečnostní politiky a firewally často blokují přímou lokální komunikaci mezi zařízeními. Telefon přes vhodnou dedikovanou síť odesílá nezpracovaná data do počítače, na kterém běží GazeDeck i samotná testovací webová platforma. Komunikace mezi systémem GazeDeck a webovou mapou pak probíhá lokálně s využitím komunikačního protokolu WebSocket. Za účelem minimalizace latence je datový tok streamován v binárním formátu. Tyto datové pakety (*ArrayBuffers*) obsahují identifikátor zařízení, identifikátor povrchu, souřadnice pohledu a časovou značku. Souřadnice pohledu jsou v souboru *map.js* v reálném čase dekodovány a transformovány na konkrétní hodnoty X a Y v rámci mapového okna.

### 4.2 Návrh testovací platformy

Pomocí moderního vite coding přístupu byla vyvinuta vlastní webová testovací platforma postavená na standardních webových technologiích HTML5, CSS3 a JS. Nejedná se o jedinou webovou mapu, ale o komplexní prostředí složené z pěti samostatných mapových variant a doprovodných informačních obrazovek. Celá testovací sada je navržena jako sekvenční webová aplikace na principu slide show. Základem je řídicí HTML dokument, který se stará o postupné spouštění jednotlivých částí experimentu. Informační obrazovky, které oddělují jednotlivé mapy a navigují respondenta, jsou řešeny jako dynamicky se zobrazující blokové elementy přímo v řídicím dokumentu. Samotné mapové varianty jsou do hlavní stránky z technologického hlediska načítány zcela izolovaně pomocí HTML elementu *<iframe>*. Plynulý přechod mezi všemi fázemi zajišťuje stisk klávesy mezerník. Zde však během vývoje nastal technologický problém spojený s architekturou využívající vložené rámce. Pokud uživatel v rámci interakce myší klikl do mapy (uvnitř

<iframe>), rámec převzal zaměření a rodičovský řídicí dokument přestal na klávesovou událost reagovat. Tento nedostatek byl vyřešen implementací komunikačního rozhraní *postMessage*. Skript uvnitř rámce zachytává stisk mezerníku a poté asynchronně odesílá textovou zprávu nadřazenému oknu, které následně zajistí posun na další snímek experimentu. Kromě mezerníku byla do platformy integrována také klávesová zkratka „H“ (home), která slouží k návratu mapy na výchozí pozici a měřítko.

Sekvence celé testovací platformy začíná úvodní obrazovkou s informacemi, na niž navazuje obrazovka s kalibračním obrázkem, vytvořeným v aplikaci Canva, pro minimalizaci odchylky pohledu se skutečnou scénou. Poté následuje tréninková mapa (0\_Training), jejímž cílem je seznámit respondenta se způsobem ovládání mapy pomocí pohledu. Záměrem tréninkové mapy je také prostorová adaptace a minimalizace vlivu efektu učení na samotné testování. Po tréninkové mapě následují čtyři hlavní testovací varianty, přičemž každá z nich představuje specifickou kombinaci ovládání myši (manuální varianta = M) a pohledem (gaze varianta = G). Kombinace využívaných modalit v jednotlivých variantách jsou detailně popsány v tabulce 2. Tento přístup umožňuje zkoumat vliv jednotlivých faktorů na chování uživatele a sbírat zpětnou vazbu z prožitku interakce. Každá varianta je oddělena informační obrazovkou vysvětlující respondentovi následující způsob interakce s mapou. Na pozadí všech mapových variant navíc běží automatické měření času v jednotkách sekund, po který měl uživatel danou mapu zapnutou. Na závěrečné informační obrazovce, která zároveň odkazuje na vyplnění dotazníku UEQ, je možné tyto časové logy stáhnout ve formátu CSV pro další analýzu. Z názvu CSV souboru je patrné nejen datum, ale i přesný čas jeho stažení.

Z hlediska adresářové struktury zobrazené na Obrázek 2 je patrné, že každá z mapových variant má svůj vlastní vyhrazený podadresář ve složce *maps/*, který obsahuje svůj specifický řídicí dokument (*index.html*), soubor s inicializací mapy a logikou ovládání (*map.js*) a soubor s definicí tematických vrstev (*layers.js*). Z hlediska vnitřní architektury jsou HTML dokumenty jednotlivých variant koncipovány tak, že načítají zmíněné skripty lokálně ze své vlastní složky, avšak pro zachování jednotného vizuálního stylu se odkazují na určité sdílené soubory v kořenovém adresáři. Konkrétně si dynamicky načítají centrální stylizační soubor (*style.css*) a skript pro automatické zobrazování AprilTagů (*tagsloader.js*). Jedinou výjimku v hierarchii představuje tréninková mapa, která z důvodu odlišného počtu prvků a specifického rozložení legendy načítá svůj vlastní lokální stylizační soubor. Zcela specifické postavení má pak samotný hlavní řídicí dokument (kořenový *index.html*), který je z důvodu nezávislosti navržen jako zcela soběstačný. Veškerá jeho formátovací kaskádová pravidla i obslužná aplikační logika jsou definovány přímo v těle tohoto dokumentu bez nutnosti odkazovat se na externí soubory.

```
index.html      # Main testing controller (slideshow of all maps)
kalibrace.png  # Calibration image shown before the test for offset correction to improve gaze
style.css      # Shared styles for all maps (except for the training one)
tagsloader.js  # Loads and positions AprilTags from YAML config
README.md
LICENSE.txt

data/          # GeoJSON data files shared across all maps
my_screen/     # AprilTag layout (surface_layout.yaml + tag_*.png images) - generated from Gaze

maps/
├── 0_Training/ # Training map (Gaze-only controls)
│   ├── index.html
│   ├── layers.js
│   ├── map.js
│   └── style.css
├── 1_M_M/      # Manual-Manual (mouse panning, mouse legend)
│   ├── index.html
│   ├── layers.js
│   └── map.js
├── 2_M_G/      # Manual-Gaze (mouse panning, gaze legend)
│   ├── index.html
│   ├── layers.js
│   └── map.js
├── 3_G_M/      # Gaze-Manual (gaze panning, mouse legend)
│   ├── index.html
│   ├── layers.js
│   └── map.js
└── 4_G_G/      # Gaze-Gaze (gaze panning, gaze legend)
    ├── index.html
    ├── layers.js
    └── map.js
```

Obrázek 2 Adresářová struktura repozitáře (snímek obrazovky z README.md).

Co se týče hostingu, probíhal vývoj a nasazení ve dvou fázích. Pro účely vývoje a průběžného testování byl využíván lokální webový server prostřednictvím pluginu *Live Server* v editoru VS Code, což bylo technologicky nezbytné pro správné načítání lokálních souborů a dynamické umísťování speciálních AprilTagů. Samotné ostré testování s respondenty pak probíhalo z produkčního prostředí, kdy byl celý repozitář hostován na veřejné doméně prostřednictvím služby GitHub Pages.

### 4.3 Zpracování prostorových dat a vizualizace

Pro vizualizaci a interakci s prostorovými daty byla zvolena open-source mapová knihovna Maplibre GL JS, která je vhodná pro složitější mapy s dynamickými prvky. Jako podkladová mapa byly využity volně dostupné vektorové dlaždice VersaTiles, které jsou primárně založeny na datech z OSM.

Všechny mapové varianty pracují s daty vymezenými pro území města Olomouce. Tematická data pro testovací mapy (vrstva budov, kaváren, restaurací, parkovišť, parků, cyklostezek a pěších zón) byla získána z databáze OSM prostřednictvím zásuvného modulu QuickOSM v programu QGIS. Pro tréninkovou webovou mapu byla využita samostatná bodová vrstva budov UP poskytnutá katedrou geoinformatiky UP. Před samotnou implementací do webového prostředí prošla veškerá surová data předzpracováním v programu QGIS. Z atributových tabulek byly odstraněny přebytečné atributy, čímž se snížil celkový datový objem vrstev pro rychlejší načítání na webu. Dále byla provedena cílená úprava dat pro potřeby experimentu. Do vrstvy restaurací byly doplněny fiktivní hodnoty kapacity a do vrstvy budov UP byl přidán nový atribut „*FAKULTA*“ s názvy fakult a ostatních univerzitních budov. Takto připravená data byla z programu QGIS následně exportována a do webových map byla načítána ve standardizovaném formátu GeoJSON a v souřadnicovém systému WGS84. Za účelem minimalizace redundance dat byly všechny GeoJSON soubory uloženy centrálně do složky *data/*, odkud si je všechny mapové varianty dynamicky načítaly.

Vizualizace dat v prostředí webové mapy je definována ve zdrojovém kódu. Pořadí vykreslování vrstev testovacích map je řízeno seznamovou datovou strukturou. Nejprve se na podkladovou mapu vykreslí polygonové vrstvy (budovy, parkoviště, parky), poté liniové (pěší zóny, cyklostezky) a v nejvyšší úrovni bodové vrstvy (restaurace, kavárny). Tím je zajištěno, že drobnější bodové prvky nejsou překryty rozsáhlejšími polygony. U vrstvy budov UP v tréninkové mapě je navíc uplatněna kategorizace na základě dříve vytvořeného atributu „FAKULTA“. Tato kategorizace je implementována prostřednictvím slovníkové datové struktury, která automaticky páruje textovou hodnotu s příslušným barevným kódem.

Aby se předešlo vizuálnímu zahlcení uživatele, je množství zobrazovaných informací dynamicky řízeno aktuálním měřítkem mapy, neboli zoom levelem. Všechny mapové varianty mají počáteční zoom level 11 s výchozími souřadnicemi Olomouce (49.593777, 17.250879). Vrstva budov UP v testovací webové mapě se zobrazuje při dosažení úrovně 12 v momentě, kdy jsou viditelné všechny mapové prvky. Datové vrstvy testovacích mapových variant se vykreslí až při úrovni přiblížení 14. Textové popisky prvků, které jsou dostupné pouze u vrstvy budov UP a restaurací, se objevují až od velmi detailního zoom levelu 18, a to pouze ve chvíli, kdy uživatel daný prvek vybere v legendě. Algoritmus pro vykreslení popisků restaurací byl navržen specificky tak, aby spojoval dva datové atributy do jednoho dvouřádkového bloku. Na prvním řádku je zobrazen název podniku, pod kterým následuje řádek s textovou konstantou doplněnou o číslo kapacity z atributu vrstvy. Popisky pro univerzitní budovy jsou vykreslovány pouze jako název zařízení. Důležité bylo sjednotit font tak, aby odpovídal dokumentaci VersaTiles.

Tento přístup s různými úrovněmi zoom levelu byl implementován částečně také ze samotných důvodů testování. Záměrné skrývání detailů prokazatelně nutí respondenta k aktivnímu průzkumu mapy, práci s měřítkem a cílené interakci s legendou při hledání konkrétního objektu na mapě. Kompletní srovnání nastavení všech mapových variant je zobrazeno v tabulce 3.

Tabulka 3 Srovnání nastavení všech mapových variant

	<b>0_Training</b>	<b>1_M_M</b>	<b>2_M_G</b>	<b>3_G_M</b>	<b>4_G_G</b>
<b>Ovládací modalita</b>	Gaze-only	Mouse-only	Panning&Zooming myši; aktivace legendy pohledem	Panning&Zooming pohledem; aktivace legendy myši	Gaze-only
<b>Zobrazená data</b>	Budovy UP	OSM data	OSM data	OSM data	OSM data
<b>Počáteční zoom level</b>	11	11	11	11	11
<b>Zoom level vykreslení dat</b>	12	14	14	14	14
<b>Zoom level vykreslení popisků</b>	18	18 (pouze vrstva restaurací)	18 (pouze vrstva restaurací)	18 (pouze vrstva restaurací)	18 (pouze vrstva restaurací)

## 4.4 Návrh uživatelského rozhraní

Pro aplikaci ovládanou pohledem vyžaduje návrh uživatelského rozhraní odlišný přístup než tradiční webový design. Na rozdíl od počítačové myši, která poskytuje uživateli jasnou haptickou a zvukovou odezvu při kliknutí, pohyb očí tuto fyzickou zpětnou vazbu postrádá. Z tohoto důvodu byl při vývoji platformy kladen důraz na design, který absenci fyzického kliknutí kompenzuje výraznou a okamžitou vizuální zpětnou vazbou.

Rozložení jednotlivých prvků na obrazovce bylo navrženo s ohledem na přirozené vizuální zkoumání. Mapová legenda byla primárně ukotvena na levé straně obrazovky. Specifickou výjimku tvořila tréninková mapa, kde bylo vzhledem k většímu počtu kategorií přistoupeno k rozdělení legendy na dva samostatné sloupce umístěné na levé i na pravé straně displeje. Interaktivní prvky musely být dimenzovány tak, aby respektovaly přirozené mikropohyby očí a drobné nepřesnosti ve snímání hardwaru. Jednotlivá tlačítka v mapové legendě proto disponují dostatečnou výškou (60px), což zabraňuje frustraci uživatele z neschopnosti trefit se pohledem na malé tlačítko.

Vizuální zpětná vazba je v aplikaci implementována pro všechny tři klíčové interakční operace. Jakmile uživatel aktivuje okrajovou zónu pro posun mapy (detailně v kapitole 4.5), systém okamžitě reaguje barevným (modrým) zvýrazněním hrany dané zóny. Uživatel tak získá jistotu, že systém jeho pohled správně detekoval, a přesně ví, jakým směrem se bude mapa posouvat. Zpětná vazba v průběhu fixování pohledu do středové zóny aktivující zoom je uživateli vizualizována pomocí dynamické animace postupně se načítající modré kružnice. Tento prvek slouží také jako vizuální odpočet, takže uživatel přesně ví, kolik času zbývá do úspěšné aktivace režimu zoomování.

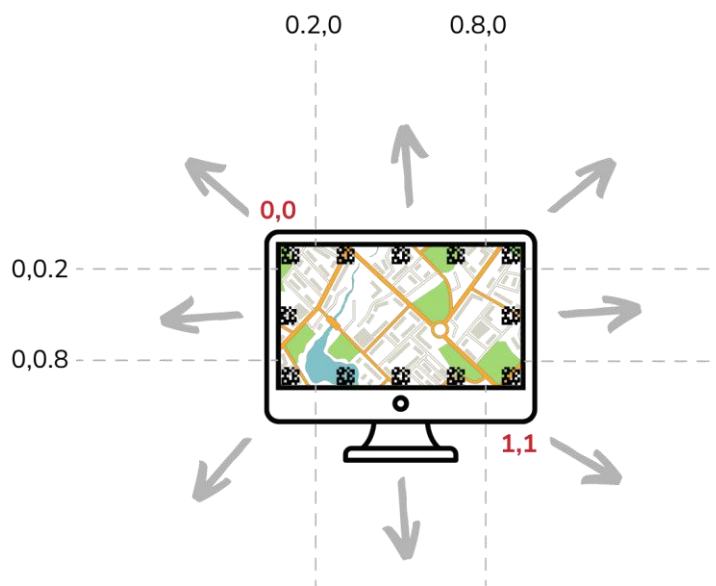
Interakce s mapovou legendou je rovněž doprovázena komplexní vizuální odezvou. Samotný průběh fixace pohledu na konkrétní prvek je uživateli v reálném čase indikován prostřednictvím zelené vodorovné načítací lišty (*progress bar*), která plynule vyplňuje spodní hranu daného tlačítka a vizualizuje ubíhající časový limit. Jakmile je tento časový práh dosažen, systém upozorní jak na aktivované tlačítko v legendě (zlaté probliknutí), tak zvýrazněním odpovídající tematické vrstvy přímo v mapovém okně. Zvýraznění bylo vizualizováno barevným potlačením ostatních datových vrstev. Z hlediska grafického návrhu bylo u hlavních testovacích map toto zvýraznění navíc doplněné cíleným ztmavením (dle parametru *selectedColor*) původního barevného odstínu. Systém byl navržen tak, aby v jeden okamžik umožňoval aktivaci a zvýraznění vždy jediné tematické vrstvy. Pokud měl uživatel zvýrazněnou již jednu vrstvu a potřeboval zkoumat další, nemusel tu původní deaktivovat, ale pouze přesunout pohled na další položku v legendě. Tím byl předchozí aktivní výběr automaticky zrušen a nově vybraná vrstva se zvýraznila. V případě variant využívajících pohled jako vstupní modalitu tak byla vizuální zpětná vazba ovládacích prvků jediným komunikačním kanálem mezi systémem a uživatelem.

## 4.5 Logika ovládání pohledem

Jednou z největších výzev při vývoji eye-trackingových aplikací je problém Midasova dotyku. Z tohoto důvodu byly do systému implementovány časové prahové hodnoty (*dwell time*). Z hlediska logiky kódu fungovaly tyto časovače na principu absolutního resetu. Pokud respondent zafixoval pohled na interaktivní prvek, ale před naplněním časového limitu z něj zrakem uhnul nebo mrknul, časovač se vynuloval a proces fixace musel být zahájen od začátku. Tím bylo zaručeno, že k interakci došlo při vědomém a nepřerušeném soustředění uživatele.

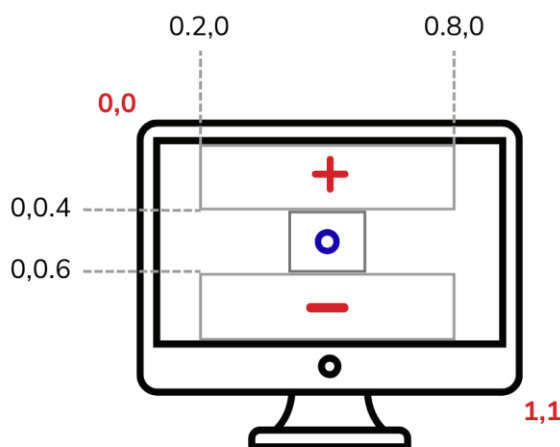
Interakce s webovou mapou ovládanou pohledem je řešena skrze neviditelné funkční zóny pro posun mapy (*panning*) i pro změnu měřítka (*zooming*). Povrch monitoru je

systemem chápán v souřadnicích v rozsahu 0 až 1. Osm interakčních zón pro posun mapy jsou definovány vně okraje monitoru, tedy souřadnicemi menšími než nula nebo většími než jedna. Každá z těchto osmi zón indikuje pohyb jedním směrem, což je znázorněno na Obrázek 3. Aby uživatel zahájil plynulý posun mapy, musí zrakem setrvat v dané zóně po dobu minimálně 500 ms. Tento časový práh byl nastaven na základě pilotního testování. Rychlost posunu není definována časově, ale prostorově pomocí frekvence překreslování obrazovky. Mapa se po aktivaci zóny posouvá o pevnou vzdálenost (výchozí hodnota = 8) pixelů za jeden snímek (*pixels per frame*) daným směrem do doby, než uživatel přesune svůj pohled zpět do mapového okna, a tím deaktivuje zónu posunu. Díky tomuto řešení nebyl pohyb mapy skokový, ale působil plynule.



Obrázek 3 Rozložení funkčních zón pro panning mapy.

Devátá funkční oblast se nachází uprostřed monitoru a slouží k aktivaci režimu zoomování. Pro přiblížení nebo oddalování musí respondent fixovat pohled do středové funkční zóny po dobu 1000 ms (1 sekunda). Po překročení časového práhu je aktivován mód, ve kterém uživatelem přesunutím pohledu do horní poloviny obrazovky mapu přiblíží nebo do spodní poloviny obrazovky oddálí o jednu zoom úroveň. Ačkoli obrazovka není nijak vizuálně dělena, na pozadí kódu je tato logika nastavena. Rozdělení obrazovky pro zoomování je patrné z Obrázek 4. Před každým přiblížením nebo oddálením je potřeba nejprve aktivovat režim zoomování setrváním pohledu ve středové funkční zóně.



Obrázek 4 Rozdělení obrazovky pro interakci změny měřítka mapy.

Aktivace a deaktivace zvýrazňování datových vrstev pohledem rovněž vyžaduje jednosekundovou fixaci na konkrétním tlačítku v legendě. Teprve po dosažení tohoto časového prahu se daná vrstva v mapě zvýrazní, případně se její zvýraznění vypne.

Konkrétní hodnoty časových limitů pro jednotlivé interaktivní prvky byly zvoleny na základě průběžného testování a ladění platformy. Pro interaktivní prvky umístěné přímo ve vnitřní ploše monitoru (středový zoom a legenda) byl záměrně stanoven vyšší práh fixace (1000ms). Důvodem je skutečnost, že se tyto prvky nacházejí v aktivním zorném poli uživatele. Během přirozeného vizuálního průzkumu mapy má respondent tendenci na tyto oblasti podvědomě nahlížet pouze za účelem čtení textu či zisku informací. Delší časový limit tak poskytuje bezpečnostní rezervu a efektivně zabraňuje nechtěné aktivaci funkcí. Naopak u funkčních zón vně monitoru sloužících pro panning byla hodnota fixace zkrácena na polovinu (500ms). Tyto zóny se nachází mimo hlavní oblast vizuálního zájmu. Pravděpodobnost, že by uživatel do těchto míst neúmyslně během čtení mapy koukal, je minimální. Kratší dwell time v tomto případě eliminuje zbytečné čekání a zajišťuje uživateli mnohem plynulejší a responzivnější zážitek z prostorové navigace.

## 4.6 Kompatibilita a interní testování platformy

Před přechodem k samotnému uživatelskému testování s respondenty proběhlo interní softwarové testování a ladění vyvinuté testovací platformy. Důraz byl kladen především na stabilitu systému a ověření správného vykreslování uživatelského rozhraní na různých typech zobrazovacích zařízeních (*cross device testing*). Kromě primárního 15,6" monitoru notebooku, na kterém probíhal vývoj, byla aplikace úspěšně otestována také na tabletu, velkoplošné televizní obrazovce a na standardním školním projektoru. V těchto případech však nešlo o plnohodnotné otestování celé platformy v její sekvenční podobě, nýbrž pouze o izolované spuštění vybraných mapových variant a otestování způsobu ovládání pomocí pohledu. Důvodem je skutečnost, že řídicí logika celé platformy je pro přechod mezi jednotlivými obrazovkami vázána na stisk klávesy mezerník, což na těchto zařízeních bez připojené klávesnice znemožňuje plnohodnotný průchod celou testovací platformou.

Přesto se během těchto testů plně osvědčil implementovaný automatizační skript *tagsloader.js*, který dokázal plynule a bez nutnosti zásahu do kódu přepočítat polohu všech AprilTagů a zobrazit je i při odlišných rozlišeních a poměrech stran. Přenos souřadnic pohledu v reálném čase přes WS protokol zůstal i na těchto zařízeních stabilní.

Součástí interního testování bylo i ověření kompatibility s mobilním zařízením. Výsledky ukázaly, že ačkoli je platforma po technologické stránce v mobilním prohlížeči spustitelná, uživatelské rozhraní pro ně není graficky optimalizované a zobrazení je nevyhovující. Prostorové rozložení legendy, fixní velikost tlačítek a celkové proporce designu byly od počátku navrhovány výhradně pro desktopová a velkoformátová zobrazení. Navíc z hlediska ergonomie a technologických limitů tento způsob ovládání prvků na malém displeji pomocí eye-tracking brýlí nedává praktický smysl. Aplikace proto neobsahuje responzivní design pro mobilní telefony a její použití je vázáno na počítačové monitory.

Po softwarové stránce bylo dále ověřeno bezproblémové fungování platformy napříč různými webovými prohlížeči (*cross browser testing*). Pro tyto účely byla využita online verze zdarma dostupné webové aplikace Browserling, v jejímž prostředí byla testovací platforma spuštěna a simulována na operačním systému Windows 10 ve všech dostupných prohlížečích. Test potvrdil kompatibilitu a stabilitu testovací platformy. Tímto interním laděním byla zajištěna maximální technologická stabilita platformy před zahájením hlavního řízeného experimentu.

## 4.7 Konfigurace a spuštění platformy

Pro zajištění plynulého chodu celé platformy je nezbytné dodržet postup jejího spuštění. Tento proces je rozdělen do tří na sebe navazujících kroků: hardwarové a síťové přípravy, inicializace softwarových komponent a finální vizuální kontroly.

### Hardwarová a síťová příprava

V prvním kroku je nutné zajistit správnou konektivitu, tedy fyzicky propojit brýle s výpočetní jednotkou a vytvořit komunikační kanál v rámci sítě.

- Eye-tracking brýle od společnosti Pupil Labs je nutné připojit pomocí kabelu k mobilnímu zařízení. Na něm musí být spuštěna aplikace Neon Companion App, která brýle napájí a zpracovává surová data z kamer. V aplikaci je možné vidět náhled okolní scény.
- Řídicí počítač, na kterém bude probíhat testování, i mobilní zařízení musí být připojeny ke stejné lokální bezdrátové síti (Wi-Fi či mobilní data). Je důležité použít připojení, které neblokuje vzájemnou komunikaci síťovým firewallem (například ne univerzitní síť Eduroam).
- Klíčovým bodem je propojení mobilního zařízení s řídicím počítačem skrze síťovou adresu <http://neon.local:8080/>. Tato adresa slouží jako výchozí bod, na kterém systém GazeDeck Console v reálném čase přebírá surový datový tok z eye-tracking brýlí. Dostupnost této adresy v prohlížeči řídicího počítače tak slouží jako potvrzení, že mobilní zařízení a počítač spolu korektně komunikují a datový most je připraven k provozu.

### Inicializace softwarových komponent

Samotná webová mapa neumí číst data přímo z eye-tracking brýlí, proto je potřeba v druhém kroku spustit middleware, který data detekuje a posílá do řídicího počítače.

- V internetovém prohlížeči je potřeba otevřít testovací platformu, která je hostovaná na službě GitHub Pages z URL (Uniform Resource Locator) adresy: [https://kacc-n.github.io/DP\\_mapy/](https://kacc-n.github.io/DP_mapy/).
- Na řídicím počítači je zároveň spuštěn nástroj GazeDeck Console dostupný jako projekt Mgr. Michaely Vojtěchovské v repozitáři na platformě GitHub (<https://github.com/misavojte/GazeDeck>), odkud jej lze spustit podle přiložené dokumentace.
- Pro zahájení přenosu dat o pohledu je nutné v GazeDeck Console konzoli zadat příkaz *stream*. Systém poté začne v síti hledat dostupná zařízení a definované povrchy. Následně systém uživatele vyzve ke dvěma krokům, a to k zadání libovolného pojmenování nalezeného definičního povrchu (dříve vygenerovaného do složky *my\_screen*) a nalezeného zařízení pro sledování očí.
- Jakmile konzole vypíše zprávu o úspěšném propojení, dojde k automatickému spojení s webovou mapou prostřednictvím komunikačního protokolu WS, čímž je zahájen plynulý tok souřadnic pohledu v reálném čase.

### Vizuální kontrola a kalibrace

V posledním kroku jsou uživateli nasazeny eye-tracking brýle. Pro minimalizaci odchylky v detekci pohledu je doporučeno spustit kalibrační obrazovku testovací platformy a dle instrukcí v mobilní aplikaci provést manuální korekci pozice ukazatele tak, aby vizuální indikátor pohledu přesně odpovídal skutečnému místu fixace uživatele na monitoru. Tím je systém plně inicializován a připraven k plnohodnotné interakci s webovými mapami ovládanými pomocí pohledu.

## 5 UŽIVATELSKÉ TESTOVÁNÍ

Fyzické testování s respondenty probíhalo v prostředí eye-tracking laboratoře na katedře geoinformatiky UP. Testování bylo prováděno na standardním notebooku s úhlopříčkou displeje 15,6 palců s Full HD rozlišením (1920 x 1080 px). Během testování bylo na monitoru zobrazeno 12 AprilTagů.

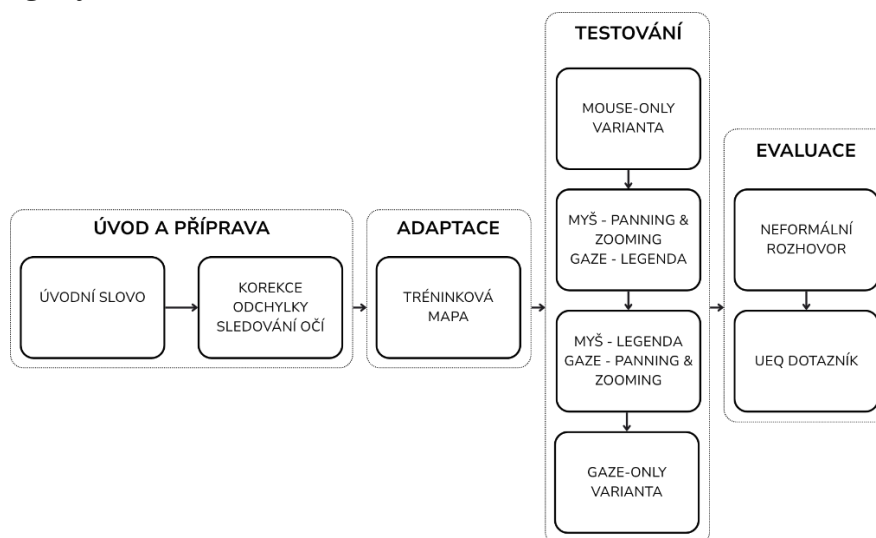
### 5.1 Výzkumný vzorek

Uživatelského testování se zúčastnilo celkem 13 participantů (6 mužů a 7 žen) ve věkovém rozpětí od 20 do 62 let, přičemž nejpočetnější skupina se nacházela v rozmezí 20 až 26 let. Z hlediska znalostí měla jasná většina participantů (9 ze 13) kartografické vzdělání, tedy měli vystudovanou nebo aktuálně studovali střední či vysokou školu kartografického, geoinformatického, geografického či jiného příbuzného oboru. Zároveň je nutné podotknout, že většina participantů neměla s ovládáním softwaru pomocí pohybu očí žádnou předchozí praxi, což pro ně z testování činilo zcela novou a netradiční uživatelskou zkušenost.

Vzhledem k technologickým specifikům eye-trackingového měření nebylo možné experiment absolvovat s nasazenými dioptrickými brýlemi, jelikož jejich obroučky a případné odlesky na sklech by mohly způsobovat chyby, které by se mohly přenést do samotného sledování bodů pohledu uživatele. Respondenti, kteří používají dioptrické brýle absolvovali testování buď s aplikovanými kontaktními čočkami nebo bez nich, pokud jim to jejich úroveň zraku při práci s monitorem umožňovala.

### 5.2 Průběh testování

Každé testování probíhalo individuálně a řídilo se daným harmonogramem, aby byly zajištěny identické a objektivní podmínky pro všechny participanty. Celý proces lze rozdělit do několika logických fází zobrazené na Obrázek 5.



Obrázek 5 Schéma průběhu uživatelského testování.

#### Úvod a příprava

Po příchodu byl respondent nejprve seznámen s účelem výzkumu a požádán o podpis informovaného souhlasu s účastí na experimentu a se zpracováním dat. Následně byla na monitoru spuštěna testovací platforma a proběhlo úvodní slovo, během kterého řešitelka

vysvětlila, co přesně bude testování obnášet a jak bude probíhat. Poté byly respondentovi nasazeny eye-trackingové brýle a byla provedena nezbytná korekce odchylky sledování očí, jejímž cílem bylo zajistit maximální přesnost snímání pro daného uživatele.

### **Tréninková mapa a prostorová adaptace**

Před přistoupením k měřeným úkolům následovala klíčová tréninková fáze. Respondentovi byla spuštěna cvičná webová mapa, na které mu byl detailně vysvětlen princip ovládání pohledem. Během této fáze proběhl také důležitý krok z hlediska prostorové orientace. Respondentům byly v nespécifickém pořadí pokládány čtyři zkušební otázky, zobrazené v tabulce 4, na které hledali odpovědi v datech. Otázky se týkaly lokalit, se kterými měli následně pracovat v ostrém testu.

Tabulka 4 Otázky pokládané respondentovi u tréninkové mapy

Napravo od hlavních kolejí procházejících hlavním nádražím je jeden samotný bod. Co to je za bod a jak se jmenuje?
Jaké fakulty se objevují v blízkosti obchodního centra Šantovka? Zvýrazněte je v mapě.
Do jaké kategorie spadá bod nejbliže Hornímu náměstí a jak se jmenuje?
Jak se jmenují koleje kolem hlavní budovy Přírodovědecké fakulty?

Cílem bylo, aby si uživatelé předem zafixovali, kde se daná zájmová území nachází. Tím se v následném testování efektivně eliminovalo časové zkreslení, které by jinak vzniklo hledáním lokalit, a měřený čas tak odrážel čistě náročnost samotné interakční modality. V případě potřeby byly respondentovi položeny i další otázky (viz tabulka 5), díky kterým si procvičil ovládání mapy.

Tabulka 5 Doplňující otázky k tréninkové mapě

Nachází se v areálu Holice nějaké koleje?
Je v Neředíně nějaká univerzitní budova (myšleno zařazena do kategorie Univerzita)?
Kolik kolejí je v Neředíně?
Jak se jmenuje kolej a ostatní sportovní zařízení v Lazcích?

### **Ostré testování**

Jakmile respondent potvrdil, že plně porozumí mechanismu ovládání a cítí se v něm jistě, plynule se přešlo k samotnému experimentu. Ten se skládal ze čtyř testovacích variant, které se respondentům ukazovaly postupně v pevně stanoveném pořadí. Každá webová mapa byla navíc proložena informační obrazovkou, která respondenta informovala o způsobu ovládání následující mapové varianty. U každé varianty byla respondentovi nejprve položena konkrétní otázka dle tabulky 6 a následně byl respondent vyzván k přechodu na mapovou variantu stiskem klávesy mezerník. Úkolem respondenta bylo pomocí daného způsobu ovládání nalézt odpověď na otázku v datech. To zahrnovalo nejprve vyhledání správné lokality. Následně pro zobrazení popisků dat aktivovat příslušnou vrstvu v legendě a přiblížit se na požadovaný zoom level, přečíst hodnotu z popisku a verbálně odpovědět.

Tabulka 6 Testovací otázky k jednotlivým mapovým variantám

<b>1_M_M</b>	V blízkosti Horního náměstí (v přilehlé ulici) je restaurace, která se jmenuje Green bar. Jakou má kapacitu?
<b>2_M_G</b>	Jak se jmenuje a jakou má kapacitu restaurace nejbliže hlavní budovy Přírodovědecké fakulty?
<b>3_G_M</b>	Kolik restaurací v obchodním centru Šantovka má kapacitu nad 60 lidí?
<b>4_G_G</b>	Jak se jmenuje restaurace nejbliže k hlavnímu nádraží, která má kapacitu nad 50 lidí?

### **Evaluace a standardizovaný dotazník**

Po úspěšném dokončení všech čtyř mapových scénářů byla práce s eye-trackingovou testovací platformou ukončena. Bezprostředně poté byl s respondentem veden krátký polostrukturovaný rozhovor složený ze tří otevřených otázek, který měl za cíl zjistit subjektivní pocity z ovládání a identifikovat největší překážky.

Následně byly z testovací platformy staženy automaticky vygenerované časové logy, které sloužily k objektivnímu vyhodnocení časové náročnosti jednotlivých úkolů a poté respondent samostatně vyplnil standardizovaný UEQ dotazník, týkající se subjektivních pocitů při práci s gaze-only variantou.

## **5.3 Metody sběru dat**

### **Sběr a analýza časové náročnosti**

Základní kvantitativní metrikou pro objektivní posouzení efektivity jednotlivých interakčních variant byl čas potřebný ke splnění úkolu. Testovací platforma byla vyvinuta tak, aby na pozadí automaticky zaznamenávala čas strávený na jednotlivých mapových variantách. Pro dosažení maximální možné přesnosti a eliminaci případné technické latence byla tato automatická data následně manuálně zpřesněna pomocí videozáznamů z eye-trackingových brýlí, které měli účastníci na sobě. Čas byl měřen od momentu dočtení testovací otázky, až po okamžik finální verbální odpovědi respondenta.

Získané časové údaje byly pro účely statistického vyhodnocení převedeny na jednotky sekund. K analýze dat byla využita popisná statistika a pro každou mapovou variantu byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, která sloužila k vizualizaci rozptylu a identifikaci individuálních rozdílů v adaptaci na ovládání pohledem. Údaje z tréninkové mapy nebyly do oficiálního srovnání zahrnuty, protože sloužily primárně k vyhodnocení úvodní prostorové a motorické orientace.

### **Standardizovaný dotazník uživatelské zkušenosti**

Pro vyhodnocení subjektivních pocitů respondentů z ovládání gaze-only webové mapy byl zvolen standardizovaný dotazník UEQ. Volba tohoto nástroje byla odůvodněna jeho schopností komplexně pokrýt nejenom klasickou použitelnost systému, ale také uživatelský prožitek a emoce. Nástroj je dostupný v podobě excel tabulky, do které řešitel zadá odpovědi respondentů z připraveného dotazníku dle instrukcí v UEQ nástroji.

Dotazník obsahuje 26 položek, které jsou koncipovány formou sémantického diferenciálu. Každá položka zahrnuje dvojici protichůdných adjektiv. Respondent mezi nimi volí na sedmibodové škále tu hodnotu, která nejlépe vystihuje jeho dojem z testované

aplikace. Nástroj následně těchto 26 položek analyticky sdružuje do šesti hlavních stupnic, které měří specifické aspekty uživatelské zkušenosti. Jedná se o *atraktivitu*, která určuje celkový vizuální a emocionální dojem z aplikace; *přehlednost* stanovující, jak snadné je seznámit se s aplikací a naučit se ji ovládat; *účinnost*, tedy zda lze úkoly plnit rychle, efektivně a bez zbytečného úsilí; *spolehlivost* vymezující míru kontroly uživatele nad systémem a jeho předvídatelnost; *stimulaci*, která určuje, jak moc je práce s aplikací vzrušující a motivující a *originalitu*, která stanovuje míru inovativnosti a kreativity návrhu aplikace.

Pro účely této diplomové práce je důležité teoretické rozdělení těchto šesti stupnic do dvou zastřešujících směrů, a to pragmatické a hédonické kvality. Pragmatická kvalita (srozumitelnost, efektivita, spolehlivost) popisuje aspekty kvality související s úkolem. Naproti tomu hédonická kvalita (stimulace, originalita) je zaměřena na netradiční zážitky a emoce. Toto rozdělení umožňuje přesně popsat paradox často spojený s novými technologiemi, tedy situaci, kdy nový systém může být z pragmatického hlediska náročný na ovládání, ale zároveň vysoce atraktivní z hlediska hédonického prožitku.

Získaná data od všech 13 respondentů byla po ukončení testování zpracována v UEQ nástroji, který automaticky transformuje původní sedmibodovou škálu na hodnoty -3 až +3 (případně -2 až +2) pro snazší interpretaci výsledků. Kromě této základní transformace a výpočtu průměrných skóre nástroj poskytuje i další pokročilé statistické výstupy. Mezi ně patří zejména výpočet rozptylu, směrodatné odchyly a 95% intervalu spolehlivosti, které indikují statistickou přesnost naměřených dat. Měřena je také vnitřní konzistence jednotlivých škál pomocí koeficientu Cronbachovo alfa, doplněná o automatickou detekci podezřelých či nekonzistentních odpovědí u jednotlivých respondentů. V neposlední řadě nástroj disponuje srovnávacím modulem, který využívá rozsáhlou databázi dřívějších evaluací k tomu, aby zařadil výsledky testovaného systému do kontextu běžně dostupných komerčních produktů.

### **Sběr a analýza kvalitativních dat**

Pro hlubší interpretaci získaných kvantitativních dat byl výzkum doplněno o kvalitativní složku v podobě krátkých polostrukturovaných rozhovorů. Ty probíhaly bezprostředně po skončení práce s mapovými variantami, kdy měli respondenti testování v čerstvé paměti. Rozhovor se skládal ze tří předem připravených otevřených otázek (viz tabulka 7), které cílily na subjektivní vnímání kognitivní zátěže a přirozenosti ovládání očima, identifikaci nejpříjemnějších prvků uživatelského rozhraní a návrhy na potenciální využití technologie v reálném světě.

Tabulka 7 Otevřené otázky pokládané respondentovi po skončení experimentu

Působil na vás způsob ovládání přirozeně, nebo jste se u něj musel soustředit (více než u myši)?
Který prvek ovládání byl nejvíce přirozený nebo příjemný?
Dokázal byste si tento způsob ovládání představit v reálné situaci? Pokud ano, tak kde?

Odpovědi respondentů byly zaznamenány na diktafon a následně přepsány do textové podoby, která byla tematicky analyzována. Cílem této metody bylo v nasbíraných odpovědích identifikovat opakující se vzorce, klíčová slova a společná témata, která následně posloužila jako hlavní argumentační základ pro diskuzi a závěrečné zhodnocení celého řešení.

## 6 VÝSLEDKY

Primárním výstupem diplomové práce je funkční testovací platforma, která slouží k ověření funkčnosti a efektivity ovládání webové mapy pomocí pohledu. Kromě samotného softwarového řešení jsou výsledkem práce také analytická data získaná z uživatelského testování a doprovodné materiály sloužící k prezentaci a dalšímu využití vyvinutého systému.

### 6.1 Interaktivní testovací platforma

Hlavním technickým výstupem je webová aplikace navržená pro sekvenční průchod experimentem. Platforma obsahuje pět webových map (jednu trénovací a čtyři testovací), které kombinují způsoby ovládání pomocí myši a pohledu. Rozhraní je optimalizované pro spolupráci s eye-tracking brýlemi od společnosti Pupil Labs díky middlewaru GazeDeck Console vyvinutým Michaelou Vojtěchovskou. Součástí platformy je systém pro automatický sběr času, po který uživatel měl zapnutou jednotlivou mapovou variantu, což umožňuje rychlé objektivní vyhodnocení experimentu.

Zdrojový kód včetně ukázkových dat je dostupný v příloze 3. Aktuální verze kódu je dostupná ve veřejném GitHub repozitáři na URL adrese [https://github.com/kacc-n/DP\\_mapy](https://github.com/kacc-n/DP_mapy). Pro spuštění webové slideshow není nutné repozitář stahovat nebo klonovat, testovací platformu lze spustit z URL adresy [https://kacc-n.github.io/DP\\_mapy/](https://kacc-n.github.io/DP_mapy/). Kromě sekvenčního průchodu celým experimentem platforma umožňuje i izolované spuštění jednotlivých mapových variant. Toho lze docílit přidáním cesty k vybrané verzi do URL adresy (například `.../maps/3_G_M`; `.../maps/0_Training`). Tento přístup umožňuje rychlou demonstraci specifických funkcionalit systému bez nutnosti inicializace celého testovacího scénáře.

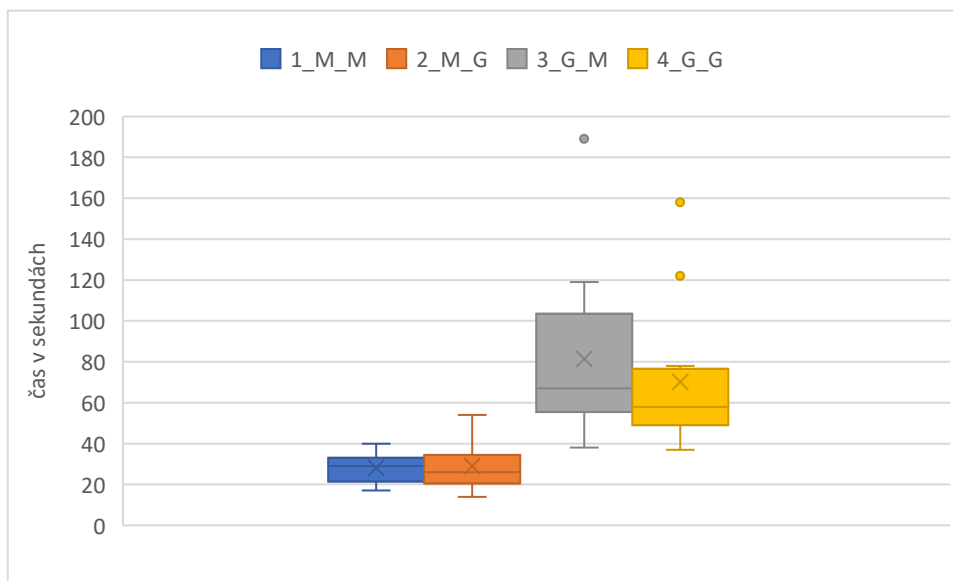
### 6.2 Analýza časové náročnosti

Základním kvantitativním ukazatelem pro srovnání efektivity jednotlivých mapových variant byl čas potřebný ke splnění definovaných úkolů. Ačkoli testovací platforma automaticky zaznamenává časové logy na pozadí, pro dosažení maximální přesnosti byla data následně verifikována a zpřesněna pomocí videozáznamů z eye-trackingových brýlí. Videozáznamy jsou uloženy na uložišti Eye-tracking laboratoře katedry Geoinformatiky. Finální časová hodnota byla pro každý úkol měřena od momentu položení dotazu až po konečnou verbální odpověď účastníka.

Pro účely statistické vizualizace a vyhodnocení byla data transformována do jednotek sekund. Úvodní tréninková mapa, která sloužila výhradně k prostorové a motorické adaptaci respondentů na eye-trackingové rozhraní nebyla do finálního srovnání efektivity zahrnuta. Průměrný čas strávený na tréninkové mapě byl 769 sekund (12 minut a 49 sekund), přičemž nejkratší doba potřebná k adaptaci činila 8 minut a 20 sekund a nejdelší 17 minut a 7 minut. Delší čas byl pozorován především u osob bez kartografického vzdělání a u starších osob.

Rozložení naměřených časů detailně zobrazuje krabicový graf (boxplot) na Obrázek 6, z něhož je patrné, že celkový čas potřebný ke splnění úkolu se pro jednotlivé mapové varianty lišil. Horizontální čára uvnitř obdélníku představuje střední hodnotu (medián), samotný obdélník znázorňuje mezikvartilové rozpětí (prostředních 50% hodnot), vertikální úsečky ukazují variabilitu zbylých dat, křížek reprezentuje průměrnou hodnotu a tečky představují odlehlé hodnoty. Analýza naměřených časů nepotvrdila předpoklad přímého

vztahu mezi rostoucím podílem ovládnání pohledem a časovou náročností experimentu. Výsledky časové analýzy jsou také dostupné jako Excel tabulka v příloze 4.



Obrázek 6 Boxplot graf zobrazující rozložení naměřených časů pro jednotlivé mapové varianty.

Nejkratších časů bylo dle předpokladu dosaženo u plně manuální varianty (1\_M\_M), kde respondenti k vyřešení úkolu potřebovali průměrně 28,23 sekund. Zásadním zjištěním je fakt, že u první kombinované varianty (2\_M\_G), ve které bylo mapou pohybováno tradičně myší a pohyb očí sloužil výhradně ke zvýrazňování vrstev skrze legendu, byly výsledné hodnoty téměř totožné. Na této variantě respondenti strávili průměrně 29 sekund. Tento minimální rozdíl ukazuje, že využití eye-trackingu pro pasivní výběr informací efektivitu práce nijak nesnižuje.

U zbylých dvou variant, kde byla na pohyb očí navázaná samotná prostorová navigace, došlo k prodloužení času nutného k vyřešení úkolu. Z výsledků jednoznačně vyplývá, že nejvyšší časovou náročnost a zároveň největší rozptyl hodnot vykazovala třetí varianta (3\_G\_M), kde pohyb mapy byl ovládán pohledem a zvýrazňování prvků probíhalo kliknutím myši do legendy. Průměrný čas strávený interakcí s mapou se u této varianty vyšplhal až na 81,38 sekund (1 minuta a 21 sekund). Tato multimodální verze se pro uživatele ukázala jako nejméně efektivní a kognitivně nejnáročnější řešení ze všech testovaných přístupů. O něco lépe dopadla varianta plně ovládaná pohledem (4\_G\_G), kde respondenti strávili průměrně 70,15 sekund (1 minuta 10 sekund). Vyšší rychlosti oproti předchozí variantě bylo dosaženo pravděpodobně díky sjednocení interakce do jednoho kanálu. Absence nutnosti přepínat pozornost mezi myší a zrakem umožnila uživatelům soustředit se výhradně na interakci pohledem, což snížilo celkovou kognitivní fragmentaci úkolu.

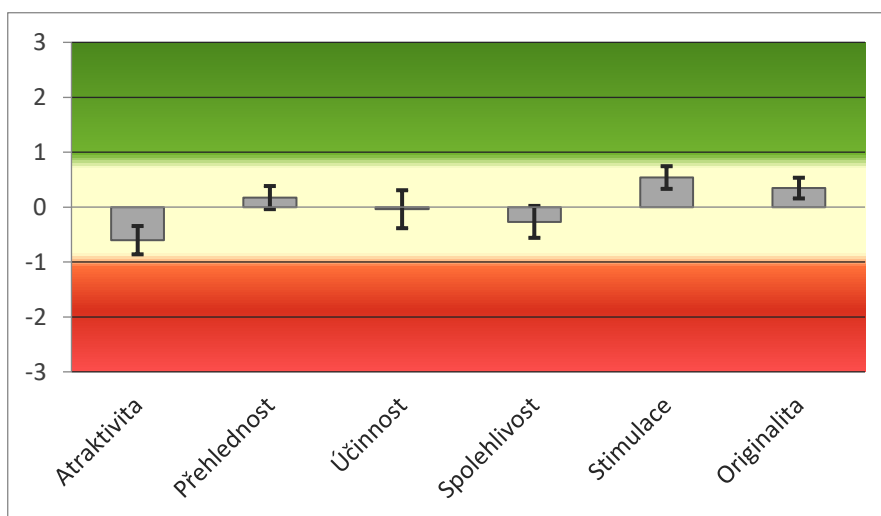
Tyto časové variability ukazují na individuální rozdíly ve schopnosti respondentů adaptovat se na bezdotykové rozhraní. Vyšší variabilita naměřených časů u gaze variant je primárně důsledkem problému Midasova dotyku. Zatímco někteří respondenti dokázali úkol splnit relativně plynule, jiní bojovali s nechtěným posunem mapy či aktivací zoomu, což je nutilo postup neustále korigovat. Tyto výsledky tak potvrzují, že zatímco manuální ovládnání je hluboce zakořeněným návykem, interakce pohledem vyžaduje specifický proces učení, během něhož si uživatel musí osvojit kontrolu nad svými očními pohyby.

## 6.3 Hodnocení uživatelské zkušenosti

Odpovědi ze standardizovaného dotazníku od 13 respondentů byly analyzovány pomocí nástroje UEQ. Výsledky (součástí přílohy 5) poskytují komplexní pohled na uživatelský prožitek a odhalují specifika spojená s experimentálním eye-tracking rozhraním. Je důležité podotknout, že hodnocení se týká mapové varianty 4\_G\_G, která je ovládaná výhradně pomocí pohybu očí.

### Hodnocení v jednotlivých škálách a dimenzích

Z analýzy průměrných hodnot všech šesti měřených škál na intervalu -3 až +3 (viz Obrázek 7) je patrný výrazný rozdíl mezi vnímáním hédonických a pragmatických kvalit testované aplikace. Nejvyššího a celkově pozitivního hodnocení dosahuje webová mapa v hédonických škálách, konkrétně ve škále stimulace (+0,54) a originalita (+0,35). Z těchto výsledků se dá usuzovat, že respondenti vnímali ovládání mapy očima jako vysoce inovativní, moderní a motivující zkušenost. Naopak v dimenzi pragmatické kvality se průměrné hodnocení pohybovalo kolem neutrálních až záporných hodnot. Přehlednost (+0,17) a účinnost (-0,04) byly hodnoceny spíše neutrálně, a škála spolehlivosti (-0,27) a celková atraktivita (-0,6) dosáhly záporných hodnot. Tento výsledek indikuje, že ačkoli je technologie pro uživatele atraktivní z hlediska novosti, její reálné použití pro plnění konkrétních prostorových úkolů je v současné fázi spojeno s vyšší kognitivní zátěží, pocitem nižší kontroly nad systémem a celkově nižší efektivitou.

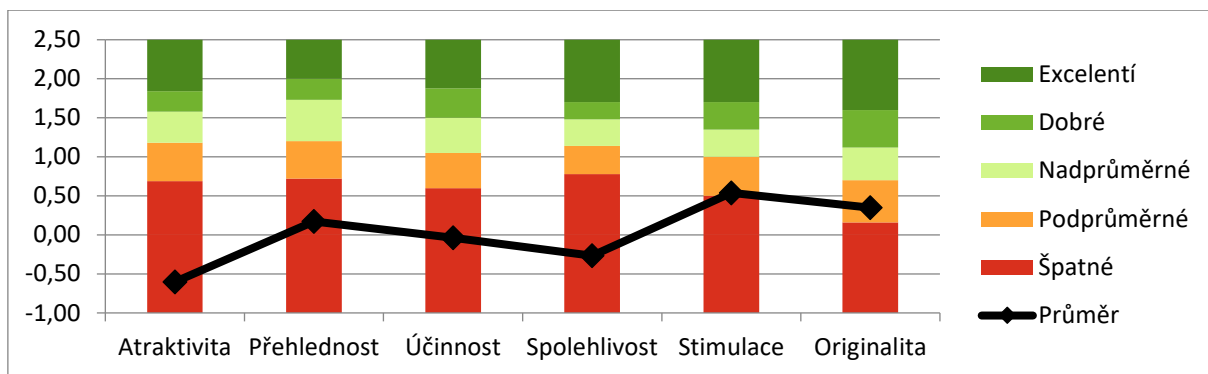


Obrázek 7 Graf zobrazující výsledné průměrné hodnoty jednotlivých škál v intervalu -3 až +3.

### Srovnání výsledků s referenčním rámcem

Pro zasazení dosažených výsledků do širšího kontextu byl využit vestavěný srovnávací modul (benchmark), který porovnává naměřená data s rozsáhlou databází již existujících evaluací softwarových produktů.

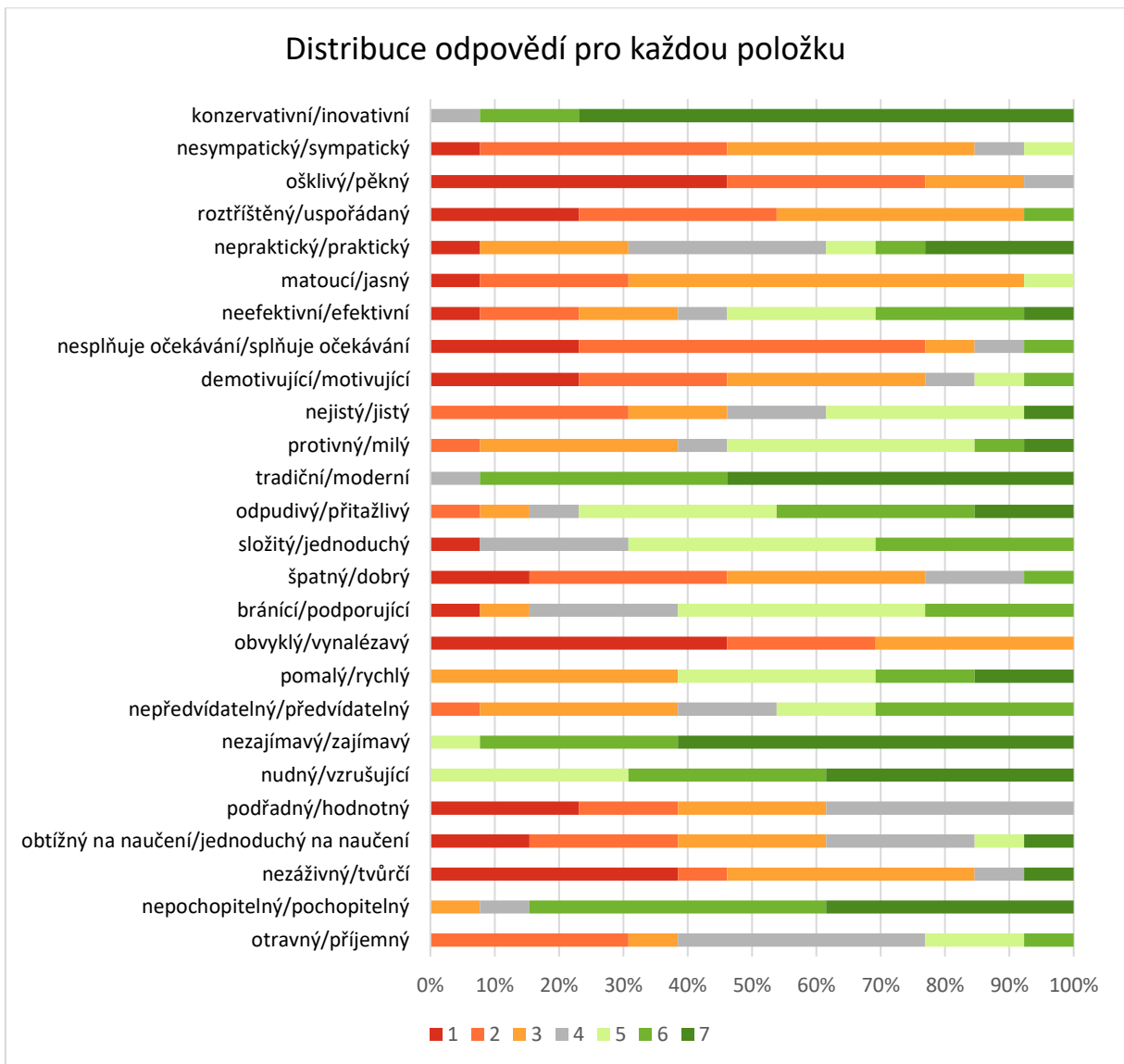
V tomto srovnání spadají výsledky testované webové mapy převážně do kategorií podprůměrné až špatné, což je patrné z Obrázek 8. Tento propad je však zcela očekávaný, protože referenční databáze UEQ je z velké části tvořena odladěnými komerčními produkty ovládanými tradičními a plně osvojenými modalitami. Horší umístění v benchmarku tedy nereflektuje chybu v návrhu samotné webové mapy, ale spíše současné technologické limity eye-trackingu, které zatím nedokážou z hlediska čisté efektivity plně konkurovat zavedeným standardům.



Obrázek 8 Graf zobrazující srovnání naměřených hodnot uživatelské zkušenosti s referenčním rámcem.

### Vnitřní konzistence

Zásadním a velmi cenným zjištěním této analýzy je samotná struktura uživatelských odpovědí zobrazena na Obrázek 9. Při statistickém měření vnitřní konzistence škál pomocí koeficientu Cronbachovo alfa vykazovala data velmi nízké, až záporné hodnoty. Analytický nástroj rovněž identifikoval vysokou míru nekonzistentních odpovědí u většiny respondentů (11 ze 13). V kontextu klasického dotazníkového šetření by tento jev mohl indikovat nepochopení otázek, což do jisté míry nelze vyloučit ani v tomto případě. Avšak v případě testování mapy ovládané pomocí eye-trackingu se může jednat o přesný odraz vnitřního rozporu uživatelů. Z detailní analýzy surových dat vyplývá, že respondenti volili extrémní a často protichůdné hodnoty v rámci jedné škály, například hodnotili aplikaci jako extrémně vzrušující a zajímavou, ale zároveň jako demotivující. Podobně ovládání označili za vysoce inovativní a moderní, ale při reálném plnění úkolů za složité nebo nepředvídatelné. Zážitek z ovládání je pro uživatele na jednu stranu fascinující a zábavný, ale na druhou stranu může vyvolávat frustraci, zejména při nechtěném spuštění funkčních zón.



Obrázek 9 Graf zobrazující distribuci odpovědí u všech položek.

## 6.4 Analýza kvalitativní zpětné vazby

Pro hlubší pochopení naměřených dat a statistických výsledků z UEQ dotazníku byly s participanty ihned po skončení testování vedeny krátké polostrukturované rozhovory. Respondenti odpovídali na tři otevřené otázky zaměřené na míru soustředění, hodnocení jednotlivých prvků a potenciál reálného využití této technologie jako ovládací modality. Nahrávky rozhovorů jsou uloženy na uložišti Eye-tracking laboratoře. Z analýzy odpovědí vyplynuly jasně se opakující vzorce a témata.

Zcela jednoznačná shoda panovala u první otázky, kdy všech 13 respondentů nezávisle na sobě uvedlo, že ovládání mapy očima vyžadovalo diametrálně vyšší úroveň soustředění než práce s myší. Většina respondentů popsala prvotní interakci jako nepřírozenou, což nejčastěji odůvodňovali hluboce zakořeněnými návyky („S myší dělá člověk 30 let“). Část respondentů však explicitně zmínila, že po úvodní tréninkové mapě se ovládání stalo výrazně snazším a komfortnějším. Zaznamenány byly i stížnosti na drobnou fyzickou nepohodu, konkrétně potřeba mít oči široce otevřené a nadměrně namáhat oko-hybné svaly, což bylo doprovázeno slzením.

Při dotazu na nejpříjemnější prvek ovládání respondenti nejčastěji hodnotili práci s legendou. Samotný výběr a zvýrazňování vrstev pohledem byly vnímány jako velmi plynulé, přičemž jeden z respondentů poznamenal, že z hlediska rychlosti byla práce s legendou pomocí očí efektivnější než při tradičním klikáním myši. V pozitivních odpovědích se podobně často objevovalo i pohybování mapou a zoomování, přestože byly oba tyto prvky označeny zároveň jako vysoce problematické a frustrující. Z odpovědí vyplynulo, že uživatelé mají přirozenou tendenci se dívat do středu obrazovky, což způsobovalo nechtěnou aktivaci zoomování („Člověk se soustředí na střed, začne fáze zoomování a člověk se pak nemůže porozhlédnout po té mapě“). Silnou bariérou byl i posun mapy při zaměření zraku mimo rám obrazovky, čímž respondent ztratil vizuální kontakt se samotnou mapou a neviděl, o jakou vzdálenost se reálně posunula („Je zvláštní se od té mapy koukat pryč, tím pádem nevíš, jak moc se posuneš“).

Navzdory kritice samotného výkonu viděli respondenti v technologii potenciál pro specifické situace a odvětví. Návrhy na uplatnění lze rozdělit do čtyř hlavních kategorií. Nejčastěji zmiňovaným scénářem bylo využití pro lidi s motorickým postižením nebo paralizací, pro které by eye-tracking představoval jedinou možnost interakce s prostorovými daty. Dále respondenti navrhovali uplatnění tohoto systému v bezkontaktním a sterilním prostředí, například v nemocnicích či v laboratořích, z důvodu infekčního a kontaminovaného prostředí. Případně v situacích, kdy je uživatel nucen pracovat rukama na jiných úkolech. Velký potenciál viděli účastníci u velkoformátových displejů či interaktivních tabulí v obchodních centrech, infocentrech, muzeích a lyžařských střediscích. Tyto situace byly odůvodňovány především nemožností se k takovému displeji dostat ať už z důvodu jeho velikosti a vzdálenosti od uživatele nebo z důvodu jakékoli překážky. Mnozí respondenti navrhovali to, co potvrdila i naměřená časová data, tedy že nejefektivnějším řešením by byla implementace multimodálního ovládání. Například pohybovat mapou pomocí trackballu a vybírat prvky v legendě pomocí očí.

## **6.5 Doprovodné materiály diplomové práce**

Pro účely seznámení širší veřejnosti s cíli, postupem, výsledky práce a fungováním platformy byly vytvořeny doprovodné materiály. Webová stránka obsahuje popis cílů práce, stručný popis použitých metod a dat, shrnutí výsledků a závěr práce. Webová stránka byla vytvořena úpravou zdarma dostupné šablony Spectral od HTML5 UP (2026) a je součástí přílohy 2. Vizuální shrnutí práce je zpracováno formou grafického abstraktu. Poster je zaměřen na schematické znázornění postupu práce, nejdůležitější technologické výstupy a přínosy práce. Vytisknutý poster je pak součástí práce jako příloha 1.

## 7 DISKUZE

Práce se zaměřuje na vývoj a testování webové mapové platformy, která kombinuje způsoby ovládání pomocí myši a pohledu. V rámci řešení byla potvrzena hypotéza, že manuální ovládání pomocí myši je v současnosti pro běžné kartografické úlohy efektivnější a rychlejší. Tento výsledek odpovídá obecným závěrům v oblasti HCI, kde tradiční vstupní zařízení stále vykazují vyšší přesnost a nižší chybovost, zejména u úloh vyžadujících jemnou motoriku a rychlou odezvu systému. K obdobným zjištěním dospěli také Stellmach a Dachzelt (2012), kteří ve své studii prokázali, že interakce pomocí myši je uživatelsky intuitivnější a vyžaduje kratší dobu nácviku než ovládání zrakem. Autoři však zároveň poukázali na to, že v některých případech může být interakce myší nepatrně pomalejší než ovládání systému pohledem. To naznačuje, že výkonnostní rozdíly mezi jednotlivými modalitami nejsou jednoznačné a závisí na konkrétním typu úlohy. Cílem testování v této práci proto nebylo překonat již zavedené ovládání myší, ale kvantifikovat rozdíly v uživatelské přívětivosti a identifikovat kritická místa, která současné implementace GBIs limitují.

Zásadním faktorem ovlivňujícím výsledky byla přesnost použitých eye-tracking brýlí Pupil Neon. Přestože byla na začátku testování provedena korekce posunu dat o směru pohledu, docházelo v reálných podmínkách k odchylkám. Projevovaly se mikropohyby oka, což vedlo k nutnosti navrhnout interaktivní prvky s dostatečnou prostorovou rezervou. Na rozdíl od řešitelky práce, u které se vyvinul díky dlouhodobému testování návyk na specifickou odchylku eye-trackingového zařízení, vykazovali respondenti, kteří s technologií pracovali poprvé, počáteční frustraci z neschopnosti přesně zaměřit svůj zrak na konkrétní prvek. Tento rozdíl je jasným důkazem vlivu efektu učení, kdy se efektivita ovládání zrakem zvyšuje s dobou praxe uživatele. Zkušenost s eye-trackingovým systémem významně ovlivňuje přesnost i subjektivní komfort interakce, což je v souladu s poznatky z oblasti adaptivních uživatelských rozhraní. Také vyšlo najevo, že individuální fyziologické vlastnosti uživatele, jako například míra otevření očí nebo i způsob nasazení brýlí, hrají v přesnosti významější roli než okolní osvětlení.

V rámci návrhu interaktivních prvků se jako klíčový parametr ukázalo nastavení časového prahu. Liao a kol. (2022) ve svých experimentech identifikovali jako optimální dwell time hodnotu 600 ms, která představuje nejlepší rovnováhu mezi efektivitou a přesností, zatímco delší časy (například 1000 ms) sice zvyšují přesnost výběru, ale vedou k rychlejší únavě. Tento fakt byl potvrzen i v rámci testování v předkládané práci, kdy respondenti negativně vnímali nutnost příliš dlouhé fixace při aktivaci zoom funkce a výběru prvků v legendě. Velikost ovládacích prvků v legendě také limitovala kartografický design aplikace z hlediska množství zobrazitelných dat. Jelikož interaktivní prvky a položky v legendě musí mít kvůli hardwarovým nepřesnostem značnou minimální velikost, aby byly bezpečně vybrány pohledem, je prostor pro komplexní legendu s velkým množstvím vrstev omezený. V případě potřeby zobrazení rozsáhlejšího datového obsahu by bylo nutné implementovat hierarchickou nebo dynamicky se posouvající legendu, což by však mohlo zvýšit kognitivní náročnost ovládání systému.

Během vývoje se vyskytly nečekané technické překážky. Kritickým momentem byla aktualizace softwaru od společnosti Pupil Labs, která dočasně narušila kompatibilitu s middlewarem GazeDeck Console a znemožnila tak přenos dat. Integrace eye-tracking hardwaru s webovými aplikacemi je citlivá na změny v softwarovém ekosystému, což představuje riziko pro stabilitu podobných experimentálních systémů. Problémy se objevily také při konfiguraci vizuálních značek a jejich interpretaci middlewarem. Ukázalo se, že

při nižším počtu AprilTagů se projevovale nepředvídatelné chování webové mapy a potíže se správným určením souřadnic pohledu. Důvodem mohla být specifika konfiguračního souboru nebo odlišnosti v nastavení. Pro zajištění maximální stability systému a eliminaci chyb při mapování zorného pole na plochu monitoru bylo nakonec zvoleno robustnější řešení s využitím dvanácti AprilTagů rozmístěných po obvodu obrazovky, které již od počátku vykazovalo plnou funkčnost.

Z hlediska vykreslování dat byla původně testována knihovna Leaflet, avšak pro finální řešení byla zvolena knihovna MapLibre GL JS. Důvodem byl vyšší výkon při zpracování většího objemu dat a plynulost renderingu vektorových dlaždic VersaTiles. I přesto se data u první testovací mapové varianty při prvním spuštění načítala znatelně déle než u následujících. Pravděpodobnou příčinou je absence počátečního uložení mapových dat do mezipaměti prohlížeče. V rámci budoucího vývoje by bylo možné tento problém eliminovat implementací načítání nezbytných zdrojů na pozadí již během úvodních instrukcí experimentu. Velikost dat, konkrétně vrstvy budov v Olomouci, se ukázala jako problémová při pokusu o externí nahrávání dat skrze službu GitHub Gist. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k hostování dat lokálně. Vzhledem k absenci profesionálních znalostí programování u řešitelky byla při vývoji prioritizována především funkčnost systému pro potřeby testování před architektonickou čistotou kódu. Aplikace byla vyvinuta s využitím čistého JS (Vanilla JS) bez použití pokročilých vývojových frameworků. Tento přístup umožnil rychlou implementaci a přímou kontrolu nad logikou interakcí, avšak může omezovat škálovatelnost a dlouhodobou udržitelnost systému.

Původní záměr implementovat zoomování pomocí sekvenčního sledování AprilTagů po obvodu obrazovky (ve směru hodinových ručiček pro přiblížení a proti směru pro oddálení o jednu úroveň) byl po interním testování zamítnut. Kvůli mikropohybům oka a případným odchylkám docházelo k nechtěnému opuštění mapového okna, což nulovalo načtenou sekvenci. Uživatel by musel vynakládat přílišnou kognitivní snahu na technické provedení úkonu namísto samotné práce s mapou, čímž by toto ovládání bylo označeno za nepoužitelné. Tento výsledek zároveň potvrzuje obecný princip HCI, že interakční mechanismy musí minimalizovat nutnost explicitního řízení kroků uživatelem a podporovat spíše přirozené a kontinuální formy ovládání. Jako alternativní, stabilnější řešení bylo zvoleno centrální funkční zóny, jež aktivuje režim zoomování (bližší popsáno v kapitole 4.5).

Někteří respondenti vnímali určité interakce jako problematické. V odpovědích neformálního rozhovoru po testování byla kritizována ztráta vizuálního kontaktu s mapou při aktivaci posouvání a také nevhodné umístění zoomovací zóny v centru monitoru. Do středu obrazovky se uživatel při čtení mapy přirozeně soustředí nejvíce, což s citlivostí systému vedlo k nechtěným aktivacím a pocitu ztráty kontroly nad webovou mapou. Pro budoucí rozvoj se nabízí několik řešení, jak tyto interakční bariéry překonat, zejména skrze multimodální přístup, který by efektivně oddělil fázi vizuálního průzkumu od fáze aktivní manipulace s obsahem. V tomto případě je možné zrak využít pouze jako ukazatel směru, zatímco pohyb mapy by byl podmíněn například stiskem určité klávesy. Obdobně by bylo možné vyřešit režim zoomování tak, aby fixace zraku sloužila jako indikátor místa přiblížení či oddálení. Tento přístup by věrněji odpovídal zažitému chování při práci s myší, kde se obraz zoomuje k aktuální pozici kurzoru, což by mohlo zvýšit intuitivnost celého rozhraní.

Limitací výzkumu může být složení testovacího vzorku. Velikost výběrového souboru ( $n=13$ ) je relativně nízká a neumožňuje formulovat obecně platné závěry o použitelnosti rozhraní ovládaného pohledem. Zároveň většina ze 13 respondentů byla z řad studentů geoinformatiky, u kterých se předpokládá vyšší technická gramotnost a zkušenost s ovládáním webových map. Ačkoli pro ně bylo ovládání pomocí pohledu novou zkušeností,

lze předpokládat, že se s ním naučí rychleji než běžná populace. Tento faktor může vést k mírnému zkreslení výsledků ve prospěch vyšší efektivity interakce. I přes to závěry testování v zásadě odpovídají rešeršovaným studiím. Konkrétně lze konstatovat shodu s výsledky studie Zhang a kol. (2024), jejichž experiment ukázal, že rozdíly v celkovém čase plnění úloh mezi ovládním myši a pohledem jsou minimální. To koresponduje se zjištěním předkládané práce, kde se vliv vstupní modalita na celkovou časovou náročnost úkolů ukázal jako nečekaně malý. Výsledky rovněž nepřímo potvrzují poznatky autorů Stellmach a Dachsel (2012) o vyšší intuitivnosti myši. V rámci diplomové práce tak byla potvrzena skutečnost, že využití GBIs v kartografických aplikacích zatím naráží na vyšší časovou náročnost a nižší efektivitu oproti tradičnímu ovládním myši, avšak při správné konfiguraci se jim v rychlosti provedení úkolů dokáže velmi přiblížit.

Vyvinutá platforma úspěšně posloužila k praktickému ověření implementace dynamické legendy, pomocí které bylo možné zvýrazňovat jednotlivé datové vrstvy, a specifických interakčních zón pro posun a změnu měřítka mapy. Platformu nelze hodnotit pouze z hlediska rychlosti a efektivity, její rozvoj má vysoký potenciál pro specifické skupiny uživatelů, zejména pro osoby s motorickým postižením, pro které představuje ovládním pohledem jedinou cestu k efektivní interakci s mapovým obsahem. Z tohoto pohledu je vhodné vnímat navržené řešení nikoli jako konkurenci běžným vstupním modalitám, ale jako jejich doplněk nejen pro specifické skupiny uživatelů.

Předložená práce otevírá prostor pro další výzkum a technologická vylepšení v oblasti kartografických rozhraní ovládaných pohledem. Budoucí vývoj by měl směřovat zejména k redukci kognitivní zátěže, zlepšení robustnosti detekce pohledu a efektivnějšímu oddělení pasivního vizuálního vnímání obsahu od aktivní interakce. Budoucí verze platformy by mohly využívat data o roztržitosti pohledu nebo velikosti zornic uživatele k odhadu jeho aktuální kognitivní zátěže. Na základě těchto odhadů by v případě vysoké zátěže, například při dezorientaci v mapě, sám systém mohl automaticky generalizovat mapový obsah v reálném čase (například snížit vizuální šum a odfiltrovat méně důležité popisky nebo zjednodušit datovou nálož v mapovém poli), dokud by se uživatel opět neorientoval a neustálil svůj pohled. Zvýrazňování prvků v legendě by mohlo být automatizováno na základě vizuální pozornosti uživatele v čase. Velký potenciál skýtá využití integrovaného gyroskopu a akcelerometru v brýlích Pupil Neon. Jemné pohyby hlavou by mohly být využity pro panning i zooming. Rozšíření webové mapy do 3D prostoru (i například s využitím setu virtuální reality) by umožnilo intuitivnější navigaci v digitálních modelech terénu nebo měst, přičemž pohled by mohl sloužit k definování osy rotace scény v bodě fixace. Dalším směrem, kterým by se budoucí vývoj mohl ubírat, by mohla být kombinace pohledu a hlasového příkazu (Gepner a kol., 2007). Tím by se zcela odstranil problém Midasova dotyku, protože k potvrzení akce by bylo zapotřebí vědomého hlasového povelu.

Lze konstatovat, že GBIs nepředstavují náhradu tradičních vstupních modalit, nicméně jejich smysluplné rozšíření může v kombinaci s dalšími vstupními modalitami zásadně ovlivnit budoucí podobu interakcí člověka s mapovými aplikacemi.

## 8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyvinout webovou mapu ovládanou pomocí pohledu. Součástí bylo také navrhnout studie, u kterých by mohl být tento způsob ovládání přínosný a zároveň otestovat funkčnost webové mapy a porovnat efektivitu ovládání pohledem oproti ovládání pomocí myši a klávesnice.

V rámci práce byla vyvinuta komplexní testovací platforma složená z celkem pěti webových mapových variant. Systém obsahuje trénovací mapu ovládanou pouze pohledem, která sloužila pro osvojení principů ovládání v průběhu testování, aby byl minimalizován vliv efektu učení na měřený čas. Dále jsou obsahem čtyři testovací mapy, které specificky kombinují interakci pohledem a myší pro posun a změnu měřítka a pro zvýrazňování datových vrstev v mapovém okně skrze interaktivní legendu. První varianta je ovládaná pouze myší, u druhé verze je myš použita k interakci s mapou a zrak pro interakci s legendou. U třetí varianty je toto ovládání opačné, tedy mapové okno je ovládáno pohledem a legenda myší. Poslední varianta je ovládaná výhradně pomocí pohledu. Tento přístup umožnil v rámci uživatelského testování vzájemně porovnat různé kombinace ovládání. Testovací platforma navíc na pozadí automaticky zaznamenává čas, po který měl uživatel jednotlivé webové mapy zapnuté, pro jednodušší interpretaci a porovnání výsledků.

Vývoj probíhal ve standardních webových jazycích HTML5, CSS3 a JS s využitím mapové knihovny MapLibre GL JS a vektorových dlaždic VersaTiles. Všechny tři interaktivní prvky mapy jsou doprovázeny vizuální zpětnou vazbou, aby uživatel věděl, že systém reaguje na jeho pohled. Pro detekci bodů pohledu uživatele bylo využito eye-trackingových brýlí Pupil Neon a pro zpracování dat v reálném čase byl použit systém GazeDeck Console poskytnutý autorkou nástroje Michaelou Vojtěchovskou, který pro mapování povrchu monitoru využívá AprilTagy. Propojení probíhalo skrze mobilní zařízení s aplikací Neon Companion App připojené na stejnou bezdrátovou síť jako řídicí počítač.

Hlavní uživatelské testování probíhalo na katedře geoinformatiky v Olomouci. Na začátku experimentu byly respondentovi oznámeny důvody testování a byla provedena korekce odchylky dat pohledu. U trénovací webové mapy, se kterou participanti interagovali průměrně 12 minut a 49 sekund, byl vysvětlen způsob ovládání mapy pohledem. Po tréninkové mapě následovaly čtyři testovací mapové varianty, u kterých respondenti hledali odpovědi na pokládané dotazy ve zobrazených datech. Bezprostředně po skončení experimentu byl s každým respondentem veden krátký neformální rozhovor o třech otevřených otázkách týkajících se subjektivního vnímání přirozenosti ovládání očima, identifikace nejpříjemnějších prvků interakce a návrhu na potenciální využití tohoto způsobu ovládání v reálném světě. Následně byl respondent požádán o vyplnění standardizovaného UEQ dotazníku.

Výsledky testování na 13 participantech potvrdily hypotézu, že ovládání systému pohledem u zdravého jedince v současnosti není efektivnější ani rychlejší než ovládání tradičními modalitami, na které je uživatel navyklý. Vyřešení úkolu u varianty plně ovládané myší trvalo respondentům průměrně 28,23 sekund, zatímco u varianty ovládané pouze pohledem průměrně 1 minutu a 10 sekund. Zajímavým zjištěním je fakt, že gaze-only varianta nebyla nejpomalejší. O 11 sekund déle, tedy 1 minutu a 21 sekund, strávili participanti na třetí variantě (mapa ovládaná pohledem, legenda myší). Multimodální, druhá, varianta (mapa ovládaná myší, legenda pohledem) s časem 29 sekund téměř konkurovala verzi ovládané pouze myší.

Z výsledků neformálního rozhovoru vyplynulo, že se všichni participanti museli na ovládání pohledem více soustředit než na ovládání myši. Zhruba třetina respondentů označila za nejpříjemnější prvek interaktivní legendu. Druhá třetina funkci zoomování a poslední třetina posouvání mapy pohledem mimo rám. To značí, že všechny prvky byly navrženy podobně intuitivně. Zároveň ale část respondentů označila možnost zoomování za nevyhovující z důvodu jeho umístění doprostřed obrazovky, kde lidé přirozeně čtou mapu. Někteří nebyli spokojeni s funkcí posouvání mapy kvůli ztrátě vizuálního kontaktu s obsahem. Reálné využití této technologie viděli respondenti například ve sterilním nemocničním prostředí, jako asistivní technologii pro osoby s motorickým postižením nebo u velkoformátových informačních panelů, kde ovládání dotykem není možné.

Výsledky standardizovaného UEQ nástroje odhalily, že ačkoli je ovládání pohledem vnímáno jako velmi inovativní, moderní a motivující zkušenost (hédonická kvalita), označili respondenti tento způsob ovládání zároveň jako demotivující, složité nebo nepředvídatelné (pragmatická kvalita). Z toho lze usuzovat, že použití eye-trackingu pro určité prostorové operace je v současnosti zatíženo vyšší kognitivní zátěží, nižší efektivitou či případným pocitem ztráty kontroly nad systémem.

Testování ukázalo, že současné eye-tracking technologie zatím nedosahují přesnosti a spolehlivosti potřebné pro plnohodnotnou náhradu tradičních vstupních zařízení v kartografických aplikacích. Avšak jako perspektivní se jeví multimodální interakce, kde by pohled rozšířil způsoby interakcí. Budoucí vývoj by se proto neměl soustředit pouze na nahrazení myši, ale na hledání efektivní kombinace více vstupních modalit. Velký potenciál je také ve vývoji webových map pro osoby s motorickým postižením, pro které představuje ovládání pohledem jedinou možnou cestu k interakci s prostorovými daty.

V kontextu tuzemského prostředí lze tuto práci považovat za průkopnickou, neboť se jedná o jednu z prvních studií, která komplexně řeší implementaci a uživatelské testování multimodálního rozhraní pro webovou kartografii s využitím pokročilého eye-tracking systému. Tento inovativní přístup otevírá široký prostor pro další rozvoj, ať už v oblasti asistivních technologií, nebo v integraci s dalšími technologiemi. Předkládaná práce tak definuje metodický i technický základ, na který mohou navazovat budoucí výzkumy směřující k plně intuitivnímu a plynulému propojení lidského zraku s digitálním mapovým prostředím.

## POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ANTHAMATTEN, Peter, 2021. How to make maps: an introduction to theory and practice of cartography. London: Routledge, Taylor & Francis Group. ISBN 9781138067806.

BATES, Richard a ISTANCE, Howell, 2004. Towards eye based virtual environment interaction for users with high-level motor disabilities. Online. In: International Journal on Disability and Human Development. 4. Walter de Gruyter. ISSN 2191-0367. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/ijdh.2005.4.3.217>. [cit. 2026-04-24].

DEEPIKA, S. S. a MURUGESAN, G., 2015. A novel approach for Human Computer Interface based on eye movements for disabled people. Online. In: . S. 1-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/icecct.2015.7226124>. [cit. 2026-04-24].

DUCHOWSKI, Andrew T., 2017. Eye tracking methodology: theory and practice. Online. Third edition. Cham: Springer. ISBN 978-3-319-57881-1. Dostupné z: [https://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/255/1/2017\\_Book\\_EyeTrackingMethodology.pdf](https://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/255/1/2017_Book_EyeTrackingMethodology.pdf). [cit. 2026-04-24].

GALANTE, Adriano a MENEZES, Paulo, 2012. A Gaze-Based Interaction System for People with Cerebral Palsy. Online. Procedia Technology. Vol. 5, s. 895-902. ISSN 2212-0173. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.09.099>. [cit. 2026-04-24].

GEPNER, Daniel; SIMONIN, Jérôme a CARBONELL, Noëlle, 2007. Gaze as a Supplementary Modality for Interacting with Ambient Intelligence Environments. Online. In: Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 848-857. ISBN 9783540732808. ISSN 0302-9743. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73281-5\\_93](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73281-5_93). [cit. 2026-04-24].

HAREZLAK, Katarzyna; DULIBAN, Arkadiusz a KASPROWSKI, Pawel, 2021. Eye Movement-Based Methods for Human-System Interaction. A Comparison of Different Approaches. Online. Procedia Computer Science. Vol. 192, s. 3099-3108. ISSN 1877-0509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.082>. [cit. 2026-04-24].

HATFIELD, F.; JENKINS, E.A.; JENNINGS, M.W. a CALHOUN, G. Principles and guidelines for the design of eye/voice interaction dialogs. Online. In: Proceedings Third Annual Symposium on Human Interaction with Complex Systems. HICS'96. IEEE Comput. Soc. Press, s. 10-19. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/huics.1996.549487>. [cit. 2026-04-24].

HOLMQVIST, Kenneth B. I.; NYSTRÖM, Marcus; ANDERSSON, Richard; DEWHURST, Richard; JARODZKA, Halszka a WEIJER, Joost van de, 2011. Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures. Online. New York, N.Y.: Oxford University Press. ISBN 9780199697083. Dostupné z: <https://books.google.de/books?id=5rIDPV1EoLUC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>. [cit. 2026-04-24].

HORNOF, Anthony; CAVENDER, Anna a HOSELTON, Rob, 2003. Eyedraw: a system for drawing pictures with eye movements. Online. Proceedings of the 6th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility. S. 86-93. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1028630.1028647>. [cit. 2026-04-24].

HTML5 UP, 2026. Spectral by HTML5 UP. *Spectral Template*. Online. Dostupné z: <https://html5up.net/spectral>. [cit. 2026-04-25].

CHIVU, Raluca Giorgiana; TURLACU, Luiza Maria; STOICA, Ivona a RADU, Andra Victoria, 2018. Identifying the effectiveness of e-learning platforms among students using Eye-Tracking technology. Online. In: Proceedings of the 4th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'18). Valencia: Universitat Politècnica València, 2018-6-20. Dostupné z: <https://doi.org/10.4995/head18.2018.8046>. [cit. 2026-04-24].

KESKIN, Merve a KETTUNEN, Pyry, 2023. Potential of eye-tracking for interactive geovisual exploration aided by machine learning. Online. International Journal of Cartography. 2023-1-10, vol. 9, no. 2, s. 150-172. ISSN 2372-9333. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/23729333.2022.2150379>. [cit. 2026-04-24].

KIEFER, Peter a GIANNOPOULOS, Ioannis, 2012. Gaze map matching: mapping eye tracking data to geographic vector features. Online. In: Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, NY, USA: ACM, 2012-11-6, s. 359-368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2424321.2424367>. [cit. 2026-04-24].

KLAMKA, Konstantin; SIEGEL, Andreas; VOGT, Stefan; GÖBEL, Fabian; STELLMACH, Sophie et al., 2015. Look & Pedal: Hands-free Navigation in Zoomable Information Spaces through Gaze-supported Foot Input. Online. Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction. 2015-11-9, s. 123-130. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2818346.2820751>. [cit. 2026-04-24].

KÜHN, Christian, 2024. The evolution of touch screens hmis in comsumer electronics. Online. Interelectronix. Dostupné z: <https://www.interelectronix.com/evolution-touch-screen-hmis-consumer-electronics.html>. [cit. 2026-04-24].

LIAO, Hua; ZHANG, Changbo; ZHAO, Wendi a DONG, Weihua, 2022. Toward Gaze-Based Map Interactions: Determining the Dwell Time and Buffer Size for the Gaze-Based Selection of Map Features. Online. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022-2-10, vol. 11, no. 2, s. 127. ISSN 2220-9964. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijgi11020127>. [cit. 2026-04-24].

MAJARANTA, Päivi; RÄIHÄ, Kari-Jouko; HYRSKYKARI, Aulikki a ŠPAKOV, Oleg, 2019. Eye Movements and Human-Computer Interaction. Online. In: Studies in Neuroscience, Psychology and Behavioral Economics. Cham: Springer International Publishing, s. 971-1015. ISBN 9783030200831. ISSN 2196-6605. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5_23). [cit. 2026-04-24].

NĚTEK, Rostislav, 2011. Possibilities of contactless control of web map applications by sight. Online. Geoinformatics FCE CTU. 2011-12-29, roč. 7, s. 55-72. ISSN 1802-2669. Dostupné z: <https://doi.org/10.14311/gi.7.5>. [cit. 2026-04-24].

NORMAN, Donald A., 2013. The design of everyday things. Online. Revised and expanded edition. New York: Basic Books. ISBN 978-0-465-05065-9. Dostupné z: <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/4bb8d08a9b309df7d86e62ec4056ceef.pdf>. [cit. 2026-04-24]

PFEUFFER, Ken; ALEXANDER, Jason a GELLERSEN, Hans, 2021. Multi-user Gaze-based Interaction Techniques on Collaborative Touchscreens. Online. In: ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New York, NY, USA: ACM, 2021-5-25, s. 1-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3448018.3458016>. [cit. 2026-04-24].

POPELKA, Stanislav, 2018. Eye-tracking (nejen) v kognitivní kartografii: praktický průvodce tvorbou a vyhodnocením experimentu. Online. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci pro katedru geoinformatiky. ISBN 978-80-244-5313-2. Dostupné z: <https://theses.cz/id/ve7g7h/Popelka.pdf>. [cit. 2026-04-24].

POPELKA, Stanislav; BURIAN, Jaroslav a BEITLOVA, Marketa, 2022. Swipe versus multiple view: a comprehensive analysis using eye-tracking to evaluate user interaction with web maps. Online. Cartography and Geographic Information Science. 2022-1-25, vol. 49, no. 3, s. 252-270. ISSN 1523-0406. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.2015721>. [cit. 2026-04-24].

RADIAH, Rivu; ABDRABOU, Yasmeeen; MAYER, Thomas; PFEUFFER, Ken a ALT, Florian, 2019. GazeButton: enhancing buttons with eye gaze interactions. Online. In: Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications. New York, NY, USA: ACM, 2019-6-25, s. 1-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3317956.3318154>. [cit. 2026-04-24].

RAYNER, Keith, 1998. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. Online. Psychological Bulletin. Vol. 124, no. 3, s. 372-422. ISSN 1939-1455. Dostupné z: <https://doi.org/10.1037//0033-2909.124.3.372>. [cit. 2026-04-24].

RUDI, David; KIEFER, Peter; GIANNOPOULOS, Ioannis a RAUBAL, Martin, 2019. Gaze-based interactions in the cockpit of the future: a survey. Online. Journal on Multimodal User Interfaces. 2019-7-19, vol. 14, no. 1, s. 25-48. ISSN 1783-7677. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12193-019-00309-8>. [cit. 2026-04-24].

SEGAN, Sancha, 2009. Why I Hate Touch Screens. All-touch interfaces like the iPhone's rip out one of your senses entirely. Online. PCMag. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/archive/why-i-hate-touch-screens-235400>. [cit. 2026-04-24].

SHAKIL, Asma; LUTTEROTH, Christof a WEBER, Gerald, 2025. A Taxonomy and Systematic Review of Gaze Interactions for 2D Displays: Promising Techniques and

Opportunities. Online. ACM Computing Surveys. 2025-7-11, vol. 57, no. 12, s. 1-37. ISSN 0360-0300. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3736250>. [cit. 2026-04-24].

SHARMA, Anjana a ABROL, Pawanesh, 2013. Eye Gaze Techniques for Human Computer Interaction: A Research Survey. Online. International Journal of Computer Applications. 2013-6-26, roč. 71, č. 9, s. 18-25. ISSN 0975-8887. Dostupné z: <https://doi.org/10.5120/12386-8738>. [cit. 2026-04-24].

SHARPLES, Mike, 1996. Human-Computer Interaction. Online. In: Artificial Intelligence. Elsevier, s. 293-323. ISBN 9780121619640. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/b978-012161964-0/50012-1>. [cit. 2026-04-24].

STELLMACH, Sophie a DACHSELT, Raimund, 2012. Investigating gaze-supported multimodal pan and zoom. Online. In: Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New York, NY, USA: ACM, 2012-3-28, s. 357-360. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2168556.2168636>. [cit. 2026-04-24].

VEENENDAAL, Bert; BROVELLI, Maria Antonia a LI, Songnian, 2017. Review of Web Mapping: Eras, Trends and Directions. Online. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2017-10-21, vol. 6, no. 10, s. 317. ISSN 2220-9964. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijgi6100317>. [cit. 2026-04-24].

VOJTECHOVSKA, Michaela, 2024. Beyond Evaluation: Utilizing Gaze-Based Interactions for Digital Cartography. Online. In: Proceedings of the 2024 Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New York, NY, USA: ACM, s. 1-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3649902.3655102>. [cit. 2026-04-24].

VOJTECHOVSKA, Michaela; POPELKA, Stanislav a KUBÍČEK, Petr, 2025. Gaze controlled maps: scoping review of gaze-based interactions in geovisualisations. Online. International Journal of Digital Earth. 2025-5-28, vol. 18, no. 1. ISSN 1753-8947. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2510563>. [cit. 2026-04-24].

WIGDOR, Daniel a WIXON, Dennis, c2011. Brave NUI world: designing natural user interfaces for touch and gesture. Online. Burlington: Morgan Kaufmann. ISBN 978-0-12-382231-4. Dostupné z: [https://www.gm.th-koeln.de/~hk/lehre/sgmci/ss2015/Literatur/Wigdor\\_Wixon\\_-\\_Brave\\_NUI\\_World.pdf](https://www.gm.th-koeln.de/~hk/lehre/sgmci/ss2015/Literatur/Wigdor_Wixon_-_Brave_NUI_World.pdf). [cit. 2026-04-24]

YOUNG, Laurence R. a SHEENA, David, 1975. Survey of eye movement recording methods. Online. Behavior Research Methods & Instrumentation. Vol. 7, no. 5, s. 397-429. ISSN 1554-351X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3758/bf03201553>. [cit. 2026-04-24].

ZENG, Zhe; LIU, Sai; CHENG, Hao; LIU, Hailong; LI, Yang et al., 2023. GaVe: A webcam-based gaze vending interface using one-point calibration. Online. Journal of Eye Movement Research. 2023-1-25, roč. 16, č. 1. ISSN 1995-8692. Dostupné z: <https://doi.org/10.16910/jemr.16.1.2>. [cit. 2026-04-24].

ZHANG, Huixin; HU, Ya; ZHU, Jun; FU, Lin; XU, Bingli et al., 2022. A gaze-based interaction method for large-scale and large-space disaster scenes within mobile virtual reality. Online. Transactions in GIS. 2022-3-7, vol. 26, no. 3, s. 1280-1298. ISSN 1361-1682. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/tgis.12914>. [cit. 2026-04-24].

ZHANG, Xiaoyi; KULKARNI, Harish a MORRIS, Meredith Ringel, 2017. Smartphone-Based Gaze Gesture Communication for People with Motor Disabilities. Online. In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM, 2017-5-2, s. 2878-2889. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025790>. [cit. 2026-04-24].

ZHANG, Changbo; LIAO, Hua a MENG, Jinhua, 2024. Evaluating the performance of gaze interaction for map target selection. Online. Cartography and Geographic Information Science. 2024-4-9, vol. 52, no. 1, s. 82-102. ISSN 1523-0406. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15230406.2024.2335331>. [cit. 2026-04-24].

## **PŘÍLOHY**

# **SEZNAM PŘÍLOH**

## **Volné přílohy**

Příloha 1 Poster

## **Elektronické přílohy**

Příloha 2 Web

Příloha 3 Testovací platforma

Příloha 4 Výsledky časové analýzy

Příloha 5 Výsledky UEQ