

Prof. IFPS dr hab. n. o zdr. inż. Tomasz Wolak
Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu w Warszawie
Naukowe Centrum Obrazowania Biomedycznego

Kajetany, 22.06.2026

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Macieja Gacy pt. „Metamodal Reading in Sighted and Blind Adults: Longitudinal and Cross-Sectional fMRI of Braille Reading”

wykonanej w Laboratory of Brain Imaging Instytutu Biologii Doświadczalnej
PAN im M. Nenckiego w Warszawie

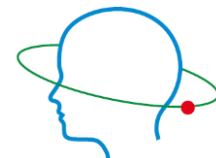
pod kierunkiem promotora profesora dr hab. Artura Marchewki

W przedstawionej mi do recenzji rozprawie doktorskiej podjęty został temat metamodalnej organizacji systemu czytania oraz plastyczności funkcjonalnej mózgu związanej z nauką czytania pismem Braille’a u dorosłych osób widzących, a także z funkcjonowaniem systemu czytania u osób niewidomych. Autor koncentruje się na pytaniu, czy sieć neuronalna zaangażowana w czytanie, zwykle opisywana w kontekście przetwarzania wzrokowego druku, może zostać zaangażowana również podczas przetwarzania pisma Braille’a w modalności dotykowej i wzrokowej. W szczególności praca odnosi się do pytania, czy wybrane obszary sieci czytania, w tym okolice brzuszno-słukowego wzrokowego, dolnego zakrętu czołowego oraz obszarów ciemieniowych, mogą pełnić funkcje względnie niezależne od modalności bodźca.

Wybór tematu pracy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny. Czytanie jest umiejętnością kulturowo nabytą, która nie ma bezpośrednio wyspecjalizowanego biologicznie modułu, lecz opiera się na adaptacji istniejących sieci percepcyjnych, językowych i poznawczych. Pismo Braille’a stanowi w tym kontekście wyjątkowo interesujący model badawczy, ponieważ pozwala oddzielić samą funkcję czytania od wzrokowej postaci bodźca. Umożliwia to zadanie pytania, czy mózg organizuje system czytania przede wszystkim według modalności sensorycznej, czy raczej według typu wykonywanego obliczenia poznawczego. Z tego powodu rozprawa ma znaczenie nie tylko dla neurobiologii czytania, ale również dla badań nad plastycznością mózgu, kompensacją sensoryczną, rehabilitacją osób niewidomych oraz szerszym rozumieniem organizacji funkcjonalnej kory mózgowej.

Największą zaletą projektu jest siedmiopunktowy schemat podłużny, obejmujący dwa pomiary bazowe, który pozwala śledzić dynamikę zmian i częściowo oddzielić efekty uczenia od habituacji oraz oswojenia z procedurą. Dodatkową wartość stanowi porównanie druku, Braille’a wzrokowego i dotykowego oraz odniesienie wyników do grupy osób niewidomych.

Układ pracy jest logiczny, a sama rozprawa napisana jest poprawną angielszczyzną naukową. Praca ma charakter empiryczny i obejmuje część teoretyczną, metodologiczną, prezentację wyników, dyskusję oraz omówienie ograniczeń i możliwych kierunków dalszych badań. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra jakość przygotowania materiału badawczego oraz staranna prezentacja wyników. Z rozprawy wynika, że Autor dobrze porusza się zarówno w literaturze dotyczącej



neurobiologii czytania, jak i w zagadnieniach metodologicznych związanych z projektowaniem oraz analizą badań fMRI.

Uwagi dotyczące wprowadzenia teoretycznego:

Wprowadzenie teoretyczne prawidłowo osadza temat rozprawy w literaturze dotyczącej czytania, plastyczności funkcjonalnej oraz przetwarzania pisma Braille'a. Autor przedstawia zagadnienie reorganizacji funkcjonalnej mózgu w wyniku uczenia się nowej umiejętności, a także problem zaangażowania obszarów tradycyjnie uznawanych za wzrokowe w przetwarzanie informacji dotykowej u osób niewidomych i u osób widzących uczących się Braille'a. Szczególnie wartościowe jest zestawienie perspektywy rozwojowej, dotyczącej nabywania czytania, z perspektywą neuroplastyczności dorosłego mózgu.

Największą zaletą jest to, że wstęp jasno uzasadnia lukę badawczą: brak badań śledzących wczesne etapy uczenia się Braille'a przy użyciu zadań językowych, brak bezpośredniego porównania wzrokowego i dotykowego LDT oraz potrzeba porównania widzących uczących się Braille'a z niewidomymi ekspertami. Te luki dobrze prowadzą do celów pracy.

W obecnej wersji wstęp jest merytorycznie trafny i wystarczająco dobrze przygotowuje rozdziały empiryczne.

Uwagi dotyczące celu badań, hipotez oraz wyboru metod badawczych:

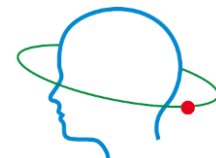
Cele badań zostały sformułowane jasno i odnoszą się do ważnych problemów współczesnej neurobiologii poznawczej. Praca dotyczy przede wszystkim tego, na jakim etapie nauki Braille'a zaczyna być angażowana sieć czytania, jakie obszary mózgu uczestniczą w czytaniu Braille'a w modalności wzrokowej i dotykowej, które z tych obszarów są wspólne dla różnych modalności prezentacji, a także czy u osób uczących się Braille'a można zaobserwować przejawy przetwarzania automatycznego.

Mocną stroną poza schematem podłużnym badania jest połączenie kilku poziomów porównania. Autor analizuje zmiany podłużne u osób widzących uczących się Braille'a, porównuje zadania różniące się modalnością i typem bodźca, a także odnosi wyniki do grupy osób niewidomych. Daje to szeroki obraz funkcjonowania systemu czytania i pozwala postawić pytanie o wspólne oraz specyficzne elementy sieci zaangażowanej w czytanie druku, czytanie Braille'a wzrokowo oraz czytanie Braille'a dotykowo.

Najważniejsze ograniczenie metodologiczne dotyczy braku aktywnej grupy kontrolnej. Grupa kontrolna miała charakter pasywny, co Autor sam uczciwie omawia w ograniczeniach pracy. W konsekwencji nie można jednoznacznie stwierdzić, czy obserwowane zmiany wynikają wyłącznie z nabywania umiejętności czytania Braille'a, czy także z wielomiesięcznego treningu dotykowego, zwiększonej uwagi poświęcanej bodźcom punktowym, motywacji, regularnego wykonywania zadań poznawczych albo innych niespecyficznych efektów uczenia się. Idealnym rozwiązaniem byłaby grupa ucząca się równie trudnego kodu dotykowego, który nie byłby pismem i nie miałby komponentu językowego. W obecnej formie można mówić o zmianach obserwowanych w toku treningu Braille'a, lecz ostrożności wymaga przypisywanie im specyficznie językowego lub brajlowskiego charakteru.

Uwagi dotyczące charakterystyki grupy badanej:

Liczebność badanych grup jest typowym wyzwaniem w badaniach neuroobrazowych. Z jednej strony koszt i obciążenie procedur fMRI ograniczają możliwość badania bardzo dużych prób, z drugiej



Dyrektor Instytutu: prof. dr hab. n. med. Henryk Skarżyński

strony analizy podłużne i whole-brain wymagają odpowiedniej mocy statystycznej. W części podłużnej grupa eksperymentalna liczyła ostatecznie 17 osób. Dla klasycznego badania fMRI jest to liczebność akceptowalna, jednak dla projektu obejmującego siedem punktów pomiarowych, wiele analiz całomózgowych i liczne porównania między punktami czasowymi jest to próba stosunkowo mała.

Szczególne znaczenie ma tu fakt, że w analizach kolejnych kontrastów czasowych, takich jak $TP2 > TP1$, $TP3 > TP2$ czy $TP4 > TP3$, nie uzyskano istotnych różnic. Autor interpretuje to jako możliwą stabilizację procesu po początkowym etapie nauki. Jest to interpretacja możliwa i zgodna z częścią wyników behawioralnych, jednak nie jest jedynym wyjaśnieniem. Brak istotnych różnic może również wynikać z niewystarczającej mocy statystycznej, szczególnie przy małej próbie i naturalnej zmienności międzyosobniczej w tempie uczenia się Braille'a. Warto byłoby w dyskusji jeszcze mocniej zaakcentować tę alternatywną interpretację.

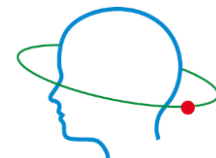
Oddzielnym problemem jest porównanie osób niewidomych i widzących. Jest ono interesujące i niewątpliwie zwiększa wartość pracy, ale interpretacyjnie pozostaje nieczyste. Grupy różnią się nie tylko doświadczeniem sensorycznym, lecz także wiekiem, proporcją płci, długością treningu, historią edukacyjną i doświadczeniem w czytaniu Braille'a. W konsekwencji nie można jednoznacznie interpretować różnic między tymi grupami jako prostego efektu braku widzenia lub cross-modal plasticity. Bardziej uprawnione jest ostrożniejsze stwierdzenie, że są to różnice między grupami o odmiennym doświadczeniu sensorycznym, edukacyjnym i treningowym. To ograniczenie nie przekreśla wartości porównania, ale zmniejsza siłę wniosków dotyczących mechanizmów specyficznie związanych z niewidzeniem.

Uwagi dotyczące metody badań:

Zastosowana metodologia jest nowoczesna i dobrze dobrana do głównych pytań badawczych. W opisie użytych sekwencji brakuje mi liczby warstw lub podania wymiarów pola widzenia (FOV), aby móc ocenić zakres objęty badaniem. Badanie fMRI w schemacie podłużnym pozwala śledzić zmiany aktywności mózgu w czasie, a użycie zadań obejmujących druk, Braille wzrokowy i Braille dotykowy umożliwia porównanie aktywacji zależnych i niezależnych od modalności prezentacji. Zastosowano zadania o analogicznej logice, choć nie w pełni dopasowane pod względem parametrów czasowych, obciążenia motorycznego i trudności.

Pewne zastrzeżenie budzi jednak sposób interpretowania aktywacji w lewym dolnym zakręcie skroniowym jako aktywacji Visual Word Form Area. W pracy nie zastosowano niezależnego lokalizatora VWFA, funkcjonalnie definiowanego ROI ani analiz łączności, które pozwoliłyby mocniej uzasadnić przypisanie obserwowanego pik do tego konkretnego obszaru funkcjonalnego. W praktyce Autor przyjmuje, że pik aktywacji znajduje się w pobliżu klasycznych współrzędnych VWFA, a zatem może być interpretowany jako aktywacja VWFA. Jest to założenie rozsądne i często spotykane w literaturze, ale nie jest to dowód jednoznaczny. W mojej ocenie bezpieczniejsze byłoby konsekwentne pisanie o aktywacji okolicy VWFA albo lewego inferior temporal gyrus w sąsiedztwie klasycznie definiowanego VWFA, a nie o jednoznacznej aktywacji samego VWFA.

Druga uwaga metodologiczna dotyczy zakresu analiz. Rozprawa dotyczy plastyczności, metamodalności i reorganizacji systemu czytania, a więc zjawisk, które mają charakter sieciowy. Tymczasem większość analiz ma charakter aktywacyjny i opiera się na klasycznych modelach GLM. Jest to podejście poprawne i uzasadnione, ale ogranicza możliwość testowania najmocniejszych tez teoretycznych. W przypadku pytania o metamodalną organizację systemu czytania szczególnie



Dyrektor Instytutu: prof. dr hab. n. med. Henryk Skarżyński

wartościowe byłyby analizy reprezentacyjne i sieciowe, takie jak RSA, MVPA, PPI, DCM, resting-state functional connectivity albo analizy grafowe. Pozwoliłyby one odpowiedzieć nie tylko na pytanie, czy podobne regiony są aktywowane w różnych modalnościach, ale także czy reprezentują podobną informację, czy komunikują się z podobnymi obszarami i czy struktura sieci zmienia się wraz z nabywaniem umiejętności czytania Braille'a.

Ponadto, zadania nie są w pełni porównywalne między modalnościami. W zadaniach wzrokowych było 8 bodźców po 1 sekundzie, a w dotykowym 5 bodźców po 5 sekund; różni się więc czas ekspozycji, tempo, obciążenie motoryczne i charakter przetwarzania. Dlatego porównania „Braille wzrokowy i dotykowy” pokazują nie tylko modalność, ale też różnice w czasie, trudności i strategii wykonania.

Warunek kontrolny w LDT nie jest idealnie dopasowany do warunku eksperymentalnego. Eksperymentalnie uczestnik wykonuje decyzję leksykalną słowo/pseudosłowo, a kontrolnie wykrywa symbol, np. dwa sześciopunkty albo hashtagi. To pomaga oddzielić komponent językowy od prostszej detekcji, ale jednocześnie kontrast obejmuje różnice w trudności, decyzyjności, uwadze, strategii i stopniu automatyzacji, a nie wyłącznie „czytaniu”.

Kolejność zadań była stała: print, tactile Braille, visual Braille. To może wprowadzać efekty zmęczenia, primingu albo przeniesienia z zadania dotykowego na wzrokowe wykonywane później. Przy pracy o różnicach modalnościowych kontrbalansowanie kolejności byłoby silniejsze metodologicznie.

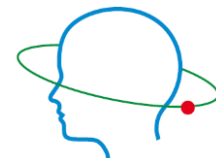
Dawka treningu jest tylko częściowo kontrolowana. Kurs miał komponent asynchroniczny, a po pierwszym miesiącu uczestnicy pracowali bardziej we własnym tempie. Szacowana liczba godzin jest podana, ale nie przeprowadzono wyraźnej analizy indywidualnej dawki praktyki jako predyktora zmian neuronalnych. To osłabia wniosek o dynamice uczenia, bo nie wiadomo, czy różnice między osobami wynikają z plastyczności, strategii, czy po prostu z realnej liczby godzin ćwiczeń.

Uwagi dotyczące prezentacji wyników badań własnych:

Wyniki badań zostały przedstawione w sposób czytelny i logiczny. Autor dobrze prowadzi czytelnika przez kolejne poziomy analizy, od zmian behawioralnych, przez aktywacje związane z czytaniem Braille'a w różnych modalnościach, po porównania z grupą osób niewidomych i zadania dotyczące przetwarzania implicytnego. Szczególnie pozytywnie oceniam ostrożność interpretacyjną Autora. W pracy wielokrotnie pojawia się świadomość ograniczeń metodologicznych, a interpretacje nie są formułowane w sposób nadmiernie kategoriowy.

Najsilniejsze dowody przedstawione w rozprawie dotyczą plastyczności funkcjonalnej związanej z nauką Braille'a u osób widzących. Projekt podłużny pokazuje, że nabywanie tej umiejętności wiąże się z angażowaniem części sieci czytania, a zmiany te pojawiają się stosunkowo wcześnie. Jest to bardzo wartościowy wynik, ponieważ pokazuje, że dorosły mózg zachowuje zdolność do reorganizacji funkcjonalnej w odpowiedzi na nabywanie nowego kodu językowego i sensorycznego.

Słabsze są natomiast dowody na pełną metamodalność systemu czytania. Wyniki pokazują nakładanie się aktywacji oraz angażowanie podobnych regionów przez różne zadania, ale nie wykazują bezpośrednio wspólnych reprezentacji neuronalnych ani transferu informacji między modalnościami. W obecnej formie praca bardzo dobrze pokazuje współangażowanie części sieci



Dyrektor Instytutu: prof. dr hab. n. med. Henryk Skarżyński

czytania, natomiast z większą ostrożnością należy traktować twierdzenie, że wykazano metamodalną organizację tej sieci.

Uwagi dotyczące dyskusji wyników i wniosków:

Dyskusja wyników jest jedną z mocniejszych części rozprawy. Autor potrafi odnieść uzyskane wyniki do literatury dotyczącej czytania, Braille'a, plastyczności funkcjonalnej i reorganizacji mózgu. Warto podkreślić, że praca nie ogranicza się do opisu istotnych aktywacji, ale próbuje wpisać je w szerszy problem organizacji funkcjonalnej mózgu. Szczególnie wartościowe jest pokazanie, że czytanie Braille'a u osób widzących nie jest wyłącznie zadaniem dotykowym lub wzrokowym, ale angażuje także sieć językową i poznawczą związaną z przetwarzaniem symboli.

Najbardziej dyskusyjna część pracy dotyczy tzw. implicit reading. Autor bardzo uczciwie wskazuje, że w tej części nie stwierdzono efektu czasu ani interakcji grupa $\times$ czas, a obecny był przede wszystkim efekt grupy. Formalnie oznacza to, że nie wiadomo, kiedy pojawiły się obserwowane różnice i czy rzeczywiście są one wynikiem stopniowej automatyzacji czytania Braille'a. Interpretacja tych wyników jako przejawu automatycznego lub implicytnego czytania jest interesująca, ale moim zdaniem nieco zbyt daleko idąca. Równie dobrze obserwowane efekty mogą odzwierciedlać większą uwagę dotykową, inne strategie eksploracji, lepszą reprezentację wzorców punktowych albo ogólne doświadczenie z materiałem Braille'owskim. Samo zaangażowanie dolnego zakrętu czołowego nie dowodzi jeszcze automatycznego czytania.

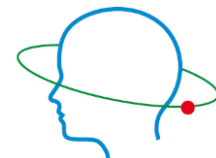
Podobnej ostrożności wymaga interpretacja porównań z osobami niewidomymi. Wyniki są ciekawe i mogą stanowić ważny punkt odniesienia dla interpretacji plastyczności u osób widzących uczących się Braille'a. Nie pozwalają jednak jednoznacznie rozstrzygnąć, które efekty wynikają z braku doświadczenia wzrokowego, które z wieloletniej praktyki czytania Braille'a, a które z innych różnic między grupami. Autor jest tego ograniczenia świadomy, co należy ocenić pozytywnie, ale w końcowych wnioskach warto utrzymać konsekwentnie ostrożny język.

Poza ograniczeniami, na które zwrócił uwagę Doktorant można wskazać kilka problemów interpretacyjnych. Efekty dla wzrokowego Braille'a nie są czystym transferem z treningu dotykowego. Kurs był opisany jako głównie dotykowy, ale uczestnicy musieli też znać alfabet Braille'a wzrokowo, żeby sprawdzać poprawność zadań; dodatkowo w każdej sesji wykonywali wzrokowy LDT Braille'a. To znaczy, że aktywacje dla visual Braille mogą wynikać nie tylko z transferu dotyk $\rightarrow$ wzrok, ale też z bezpośredniego uczenia się i powtarzanej ekspozycji wzrokowej na Braille'a.

Ocena spełnienia wymagań stawianych rozprawie doktorskiej

Rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobrą wiedzę teoretyczną Autora w zakresie neurobiologii czytania, plastyczności funkcjonalnej i metod neuroobrazowania. Autor wykazuje znajomość aktualnej literatury oraz umiejętność osadzenia własnych wyników w szerszym kontekście badań nad organizacją funkcjonalną mózgu.

Potwierdza również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczy o tym przede wszystkim udział w bardzo złożonym projekcie podłużnym, obejmującym wielokrotne pomiary fMRI, złożone zadania eksperymentalne, analizę danych behawioralnych i neuroobrazowych oraz interpretację wyników w kontekście kilku konkurencyjnych wyjaśnień teoretycznych. Szczególnie wysoko oceniam zdolność Autora do krytycznej autorefleksji i wskazywania ograniczeń własnego projektu.



Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalność polega przede wszystkim na zastosowaniu podłużnego projektu fMRI do badania procesu nabywania czytania Braille'a u osób widzących oraz na zestawieniu czytania Braille'a w modalności wzrokowej i dotykowej z klasycznym czytaniem druku oraz z wynikami osób niewidomych. Praca wnosi istotny wkład do badań nad plastycznością funkcjonalną dorosłego mózgu i nad tym, w jaki sposób sieci neuronalne związane z czytaniem mogą zostać zaangażowane przez nowy kod sensoryczno-językowy.

Uwagi dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań:

Wyniki rozprawy mają znaczenie przede wszystkim poznawcze i metodologiczne. Pokazują, że nauka Braille'a może być użytecznym modelem badania plastyczności funkcjonalnej u dorosłych. Jednocześnie praca bardzo dobrze wskazuje, jakie elementy powinny zostać wzmocnione w kolejnych badaniach. W przyszłych projektach warto rozważyć zastosowanie aktywnej grupy kontrolnej uczącej się kodu dotykowego pozbawionego znaczenia językowego, zwiększenie liczebności grup, funkcjonalne lokalizowanie VWFA na poziomie indywidualnym oraz włączenie analiz sieciowych i reprezentacyjnych. Takie analizy pozwoliłyby mocniej testować hipotezę metamodalności i odróżniać wspólną aktywację od wspólnych reprezentacji neuronalnych.

Pytania do Doktoranta

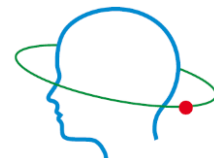
- Jaki był zakres badanej objętości mózgu (ilość warstw, FOV)?
- W jaki sposób Autor odróżniłby efekty specyficzne dla czytania Braille'a od efektów ogólnego treningu dotykowego, uwagi i motywacji, gdyby projekt miał zostać rozszerzony o aktywną grupę kontrolną?
- Jakie analizy dodatkowe, na przykład connectivity, RSA lub MVPA, byłyby zdaniem Autora najbardziej przydatne do silniejszego testowania hipotezy metamodalności systemu czytania?
- Na ile można jednoznacznie interpretować aktywację lewego inferior temporal gyrus jako aktywację VWFA bez niezależnego lokalizatora funkcjonalnego tego obszaru?
- Jak Autor interpretuje wyniki dotyczące implicit reading w świetle braku efektu czasu i braku interakcji grupa $\times$ czas?

Podsumowanie:

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Metamodal Reading in Sighted and Blind Adults: Longitudinal and Cross-Sectional fMRI of Braille Reading” jest bardzo dobrą pracą dokorską pod względem technicznym, metodologicznym i poznawczym.

Najważniejsze ograniczenia pracy dotyczą braku aktywnej grupy kontrolnej, niewielkiej liczebności grupy eksperymentalnej, interpretowania aktywacji okolicy lewego inferior temporal gyrus jako VWFA bez niezależnego lokalizatora, częściowego utożsamienia współaktywacji z metamodalnością oraz stosunkowo daleko idącej interpretacji wyników dotyczących implicit reading. Ograniczenia te nie podważają wartości rozprawy, ale wpływają na siłę niektórych wniosków teoretycznych. W mojej ocenie dowody na plastyczność funkcjonalną związaną z nauką Braille'a są bardzo mocne, natomiast dowody na silnie rozumianą metamodalność systemu czytania są umiarkowane i wymagają dalszych badań z użyciem analiz reprezentacyjnych i sieciowych.

Uwzględniając znaczenie podjętej problematyki, oryginalność projektu, wysoki poziom metodologiczny, wartość poznawczą uzyskanych wyników oraz bardzo dobrą znajomość przez Autora



Dyrektor Instytutu: prof. dr hab. n. med. Henryk Skarżyński

zagadnień neurobiologii czytania i neuroobrazowania, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.) i o **dopuszczenie mgr. Macieja Gacy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz o wyróżnienie rozprawy.**

Prof. dr hab. Zofia Wodniecka-Chlipalska
Zakład Psychologii Eksperymentalnej
Laboratorium Psychologii Języka i Dwujęzyczności
Instytut Psychologii Uniwersytetu Jagiellońskiego
ul. Ingardena 6, 30-006 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Macieja Gacy pt.:
***“Metamodal Reading in Sighted and Blind Adults:
Longitudinal and Cross-Sectional fMRI of Braille Reading”***
Promotor: prof. dr hab. Artur Marchewka

Praca doktorska mgra Macieja Gacy dotyczy neuronalnych korelatów (nabywania) umiejętności czytania alfabetem Braille’a, a na poziomie bardziej ogólnym - zagadnienia organizacji funkcjonalnej systemu czytania oraz plastyczności mózgu człowieka dorosłego. Jej centralnym pytaniem jest, czy sieć neuronalna zaangażowana w czytanie ma charakter metamodalny, tj. czy obszary związane z przetwarzaniem pisma i języka są angażowane niezależnie od modalności sensorycznej, przez którą informacja dociera do mózgu. W pracy analizowane są cztery problemy badawcze dotyczące natury i charakterystyki czasowej procesu uczenia się czytania alfabetem Braille’a: (1) dynamika zmian behawioralnych i neuronalnych w trakcie nauki czytania; (2) odrębność sieci neuronalnej zaangażowanej w przetwarzanie tego alfabetu; (3) automatyczność procesów czytania oraz (4) podobieństwa i różnice w przetwarzaniu alfabetu Braille’a u osób widzących i niewidomych. Autor podejmuje rozwiązanie tych problemów analizując dane zebrane w ramach większego projektu kierowanego przez Promotora dotyczącego dynamiki plastyczności ludzkiego mózgu w procesach uczenia się. Przeprowadzone przez mgra Gacę analizy są podstawą rozdziałów 4 do 7 pracy doktorskiej. Rozdziały przedstawiają wyniki kolejnych analiz podłużnych i/lub poprzecznych uzyskanych przez osoby widzące uczące się alfabetu Braille’a oraz osoby niewidzące od urodzenia. Dane podłużne były zebrane na grupie 17 osób badanych siedmiokrotnie w okresie 10 miesięcy (oraz na pasywnej grupie kontrolnej), natomiast analizy poprzeczne wykorzystywały dane z jednorazowego pomiaru u osób niewidzących. Opis badań poprzedzony został wstępem teoretycznym (rozdział 1) spinającym wszystkie poruszone w pracy wątki, przedstawieniem celów oraz hipotez badań własnych (rozdział 2) oraz częścią metodologiczną (rozdział 3) przedstawiającą szczegóły dotyczące osób badanych, zastosowanych zadań i parametrów zbierania i analizy danych. Całość wieńczy dyskusja

ogólna (rozdział 8). Choć nie jest to jasno wskazane w pracy, część wyników przedstawionych w pracy stanowiło podstawę wieloautorskiego artykułu, którego mgr Gaca był pierwszym autorem: *Gaca M, Olszewska AM, Drożdżel D, Kulesza A, Paplińska M, Kossowski B, Jednoróg K, Matuszewski J, Herman AM and Marchewka A (2025) How learning to read Braille in visual and tactile domains reorganizes the sighted brain. Front. Neurosci. 18:1297344. doi: 10.3389/fnins.2024.1297344*

Moja ocena przeprowadzonych eksperymentów jest wysoka. Część empiryczna jasno dowodzi umiejętności metodologicznych Autora. Na szczególne uznanie zasługuje wielokrotny pomiar poprzeczny, jak również pomysłowe zadania eksperymentalne umożliwiające bezpośrednie zestawienie: klasycznego czytania druku, wzrokowego czytania Braille'a oraz dotykowego czytania Braille'a. Najpoważniejszym mankamentem metodologicznym jest w mojej ocenie fakt, że grupa kontrolna była pasywna, czyli nie przechodziła równoległego treningu innej umiejętności. Autor sam bardzo słusznie przyznaje, że z tego powodu nie da się w pełni wykluczyć wpływu rozmaitych zmiennych zakłócających, takich jak oczekiwania, zaangażowania, samego treningu dotykowego, innych zmian związanych z wielokrotnym uczestnictwem w badaniu. Zasadniczo utrudnia to wnioskowanie na temat przyczyn zmian aktywności mózgu i przypisywania ich samemu treningowi Braille'a. Oczywiście narzucające się do Doktoranta pytanie to jaki argument uzasadniał podjęcie – ryzykownej metodologicznie – decyzji o pasywności grupy kontrolnej? Niezależnie od odpowiedzi na to pytanie, biorąc pod uwagę naturę zebranych danych, w mojej ocenie wnioski wynikające z badań powinny być sformułowane ostrożniej, np. sformułowanie „experience-dependent brain plasticity” warto by było zastąpić sformułowaniem „experience-associated”. Drugi mankament metodologiczny jaki dostrzegam to brak dopasowania grupy widzących do niewidomych. Ze względu na fakt, że grupa osób niewidomych jest trudniejsza do zrekrutowania, wydaje się, że uzasadnione byłoby zastosowanie metody dopasowywania osób badanych parami podporządkowując kryteria doboru grupie niewidomych (czyli do każdej osoby niewidomej dopasowanie jej najlepszego pod względem kluczowych kryteriów odpowiednika). Bez takiego zabiegu powstaje bowiem pytanie w jakim stopniu różnice między osobami niewidomymi i widzącymi można rzeczywiście przypisać deprywacji wzrokowej, skoro grupy różniły się wiekiem, płcią i doświadczeniem w czytaniu Braille'a? Domyślam się, że przy obydwu kwestiach zaważyły zapewne względy pragmatyczne, jednak pytanie czy taka ‘droga na skróty’ zawsze się opłaca. Z drugiej strony warto by było uzasadnić czy i dlaczego te zmienne, o których wiadomo, że niw były zbalansowane między grupami mogłyby zmieniać uzyskane wyniki. Czy są przesłanki sugerujące taki wpływ? W tym miejscu warto też zaznaczyć, że grupa kontrolna dopasowana była do grupy eksperymentalnej pod względem niewielkiej liczby kryteriów. Szczególnie istotne wydaje się dopasowanie w takiej sytuacji grup pod względem innych znanych badanych języków. Wiemy, że grupy były dopasowane pod względem liczby znanych języków, ale już

nie nie wiemy ani na temat poziomu tej znajomości, ani – co szczególnie istotne w kontekście celu badania – podobieństwa alfabetów. Mimo kilku krytycznych uwag powyżej (i dodatkowo tych wskazanych w pracy przez samego Autora), zebrany materiał empiryczny jest bardzo wartościowy.

Prócz niewątpliwych walorów samych badań na uwagę zasługuje bardzo dobrze napisany Wstęp, w którym, w którym Autor syntetycznie, ale wyczerpująco przedstawia wszystkie najważniejsze zagadnienia łączące się z tematyką pracy, dowodząc swojej obszernej wiedzy i erudycji. Jasno wskazuje ograniczenia wcześniejszych badań prowadzonych w tym nurcie, demonstrując nowatorski charakter badań własnych. Na wyróżnienie zasługują również przeprowadzone kolejne analizy, jak i podsumowujące je krótkie dyskusje. Doktorant bardzo dojrzałe wskazuje niedoskonałości zastosowanej metodologii zawężające możliwości wnioskowania oraz wskazując dalsze ścieżki badawcze. Pewne rozwiązania metodologiczne zastosowane w pracy znacznie ograniczają możliwości interpretacyjne, jednak Autor jest ich bardzo świadomy, co podkreśla w tekście wielokrotnie, wchodząc niejako w rolę krytycznego recenzenta swojej pracy. Dowodzi to umiejętności samodzielnego prowadzenia badań. O kwestiach ograniczeń, które warto by były rozwinąć napisałam powyżej.

Największy niedosyt pozostawiła we mnie Dyskusja Ogólna. I to do niej chciałabym przede wszystkim odnieść się w swoich uwagach. Mam nadzieję, że w trakcie obrony Doktorant będzie mógł się do nich ustosunkować. Pytania, jakie chciałabym zadać Doktorantowi dotyczą kwestii, które wydają się narzucające, a do których nie znalazłam żadnych odniesień w tekście:

1. W Dyskusji Autor pisze, że badania wnoszą nowe światło do rozumienia neuroplastyczności mózgu. Jednak wątek ten jest potraktowany dość pobieżnie; w tekście nie natknęłam się na pogłębioną refleksję dotyczącą tej kwestii. Na przykład na str. 133 Autor pisze, że uzyskane wyniki „pozwalają udoskonalić obecne modele”. Jednak opis jest bardzo skrótowy i nie daje możliwości czytelnikowi na zrozumienie jak konkretnie uzyskane wyniki te modele udoskonala. Czego - dzięki badaniom Autora - dowiedzieliśmy się o ogólnym mechanizmie neuroplastyczności, czego nie wiedzieliśmy wcześniej?
2. Czy badania Autora wnoszą coś do teorii procesów czytania, wykraczającego poza alfabet Braille’a? Czy (i co) wnoszą do rozumienia procesów uczenia się nowych alfabetów w ogóle, czy pomagają zrozumieć naturę trudności w ich uczeniu się?
3. Autor wielokrotnie wskazuje, że wyniki wskazujące na angażowanie tych samych obszarów nie są równoznaczne z dowodem na identyczność obliczeń neuronalnych. Jest to metodologicznie i konceptualnie bardzo ważne zastrzeżenie. Wskazanie na angażowaną w trakcie nauki jakiejś czynności sieć neuronalną nie pozwala odpowiedzieć na pytanie jak ta czynność/czy jej nauka zachodzi, jaki dokładnie mechanizm plastyczności odpowiada za

obserwowane zmiany. Moje pytanie do Doktoranta to: jak w takim razie powinien/mógłby wyglądać program badawczy próbujący odpowiedzieć na pytanie dt. mechanizmów obliczeniowych właśnie? Czy badania takie jak Autora muszą je koniecznie poprzedzać?

4. Czy badania nad mechanizmami uczenia się alfabetu Braille'a mają jakieś implikacje praktyczne? Jeśli tak to jakie?

Ogólnie, lektura tekstu pracy była dla mnie przyjemnością, choć w kilku miejscach utrudniały ją niedoprecyzowania lub niejasności:

- Predykcje kończące wstępy do poszczególnych analiz są sformułowane wg mnie w mało precyzyjny sposób i dodatkowo – brakuje ich uzasadnienia i wskazania implikacji teoretycznych.
- W części 1.6 nagle Autor robi odniesienia do paradygmatów własnych badań. Bez ich wcześniejszego wprowadzenia te odniesienia są niejasne
- Lekturę bardzo uprościłoby, gdyby podpisy tabel i rycin miały w numeracji też numer rozdziałów, a poszczególne akapity miały wyróżnione graficznie wcięcia
- Jest dla mnie dość niezrozumiałe, że w miejscach w których Doktorant pisze o większym projekcie, którego badania były częścią (np. str. 2 czy 25), nie wymienia nazwiska kierownika projektu

Wszystkie drobne niedoróbki i wskazane powyżej wątpliwości nie umniejszają wkładu merytorycznego rozprawy w zrozumienie neuronalnych podstaw umiejętności czytania w alfabecie Braille'a. W tym aspekcie rozprawa zasługuje na najwyższą ocenę. Badania dotyczą istotnego i mało zbadanego zagadnienia, dotyczą ważnych pytań z zakresu neuroplastyczności mózgu, są oryginalne i metodologicznie poprawne. Przeprowadzone analizy przyniosły wiele ciekawych odkryć, które stanowią kolejny ważny krok w poznaniu podstaw przetwarzania języka przez osoby niewidome, jak również w rozumieniu procesów czytania.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca wskazuje na wiedzę i kompetencje badawcze Autora oraz dobre przygotowanie Doktoranta do samodzielnego projektowania i prowadzenia badań z wykorzystaniem metod neuroobrazowania. Autor jasno sformułował problemy badawcze i wytyczył ścieżki ich rozwiązania. Pomimo wskazanych ograniczeń metodologicznych i interpretacyjnych, wyniki rozprawy niewątpliwie stanowią wartościowy wkład w badania nad neuroplastycznością i

metamodalną organizacją funkcjonalną mózgu. Tym samym stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art.187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce(Dz. U. z 2024r. poz.1571 z [póź.zm](#)) i wnioskuję o dopuszczenie pana mgra Macieja Gacy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Kraków 19 sierpnia 2026r.

Prof. dr hab. Inż. Piotr Bogorodzki,
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych
Politechnika Warszawska

KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Metamodal Reading in Sighted and Blind Adults: Longitudinal and Cross-Sectional fMRI of Braille Reading

Autor rozprawy:

mgr Maciej Gaca

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedmiotem rozprawy jest problem organizacji funkcjonalnej sieci czytania u dorosłych, w szczególności roli lewej brzusznej kory potyliczno-skroniowej, w przetwarzaniu informacji językowej prezentowanej drogą wzrokową i dotykową. Rozprawa ma przede wszystkim charakter doświadczalny, z wykorzystaniem metod neuroobrazowania funkcjonalnego oraz analiz statystycznych danych neuroobrazowych fMRI.

Ocena celów pracy i jej głównej tezy sprawiła mi duże trudności. W pracy nie sformułowano tezy w ścisłym sensie. Autor stawia cztery pytania badawcze i odpowiadające im przewidywania dopiero w rozdz. 2.1 na stronie 23. Sformułowanie głównej części tezy (domniemanej), że czytanie Braille'a angażuje wspólny rdzeń sieci czytania, a zarazem zachowuje różnice zależne od drogi wejścia bodźca, zadania, etapu treningu i doświadczenia sensorycznego, jest zbyt ogólne. Nie pomaga w tym często używane przez autora pojęcie „metamodalności” jako „wspólne zaangażowanie związane z czytaniem” z zastrzeżeniem, że nie oznacza to identyczności przetwarzania ani niezależności od modalności (s. 14 i 23). Bardzo proszę o wyjaśnienie przez doktoranta, co rozumie przez to pojęcie, ponieważ podana w pracy definicja „The term metamodal is used in a restricted sense to denote shared recruitment of reading-related regions across modalities; it does not imply identical computations, complete modality independence, or insensitivity to sensory experience.” jest dla mnie trudna do zrozumienia i nie przekłada się w sposób jednoznaczny na formalne miary używane w czynnościowym rezonansie magnetycznym. W szczególności proszę o doprecyzowanie w czasie obrony następujących zagadnień:

- jakie kryterium rozstrzyga o odrzuceniu hipotezy metamodalności,
- czy chodzi o nakładanie się aktywacji na poziomie grupowym (konjunkcja map),
- jaki obszar anatomiczny lub funkcjonalny autor rozumie jako „VWFA” oraz w jaki sposób był wyznaczany.

Doprecyzowanie tych aspektów pozwoliłoby lepiej zrozumieć zakres i cel pracy, a jednocześnie uczyniłoby tezę bardziej jednoznaczną i konkretną. Bez tego

główna konkluzja pracy („findings support a shared reading-related core across modalities”, s. 135) ma charakter raczej opisowy niż weryfikacyjny.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

We wprowadzeniu (rozdział 1) autor przedstawia historię pojęcia neuroplastyczności, neurobiologię czytania, hipotezę metamodalnej organizacji kory oraz modele dynamiki plastyczności. Omawia też szczegółowo dotychczasowe badania nad nauką Braille'a przez osoby widzące. Autor rzetelnie wskazuje ograniczenia wcześniejszych prac: brak zadań lingwistycznych w pierwszych tygodniach nauki, brak bezpośredniego porównania czytania wzrokowego i dotykowego oraz brak porównania z niewidomymi ekspertami. Słabą częścią pracy jest natomiast podrozdział 1.3, poświęcony fizjologicznym i fizycznym podstawom metody fMRI, czyli metody pomiarowej, na której opiera się cała rozprawa. Zawiera on nieścisłości i błędy merytoryczne:

Opis mechanizmu kontrastu BOLD (s. 11) Na stronie 11 autor pisze, że fMRI „uses T2*w images to measure metabolic activity and variability in the brain's oxygen demand”. Sygnał BOLD **nie jest** miarą aktywności metabolicznej. Jest wypadkową zmian przepływu krwi, objętości krwi i zużycia tlenu. Rozdział kończy się stwierdzeniem, że paramagnetyczna deoksyhemoglobina powoduje, iż zmiana jej stężenia „increases the T2*-weighted MR signal”. Czyli im większe stężenie deoksyhemoglobiny, to sygnał MR jest większy? Brakuje wyjaśnienia, na czym polega związek między niejednorodności podatności magnetycznej w otoczeniu naczyń (co go powoduje?) , utratę koherencji fazowej spinów i skrócenia czasu T2*. Proszę o ustosunkowanie się do tych kwestii na obronie. Tego typu uproszczenia prowadzą w dalszej części pracy do nadinterpretacji amplitudy sygnału jako „intensywności przetwarzania”.

Na tej samej stronie czytamy, że ATP „is produced from the glycolytic oxygenation of glucose, mainly done by the mitochondria. Its byproduct is carbon dioxide”. Glikoliza zachodzi w cytoplazmie i nie wymaga tlenu. W mitochondriach zachodzą cykl Krebsa i fosforylacja oksydacyjna, a termin „glycolytic oxygenation” nie istnieje.

Brakuje też jakiegokolwiek omówienia użytych technik skanowania (EPI, rozdzielczość przestrzenna i czasowa, zniekształcenia geometryczne i utrata sygnału). Te zagadnienia mają bezpośrednie znaczenie dla interpretacji wyników, o czym piszę w punkcie 3. Tytuł podrozdziału 1.3, zapowiadający MRI jako „kluczową metodę”, nie znajduje pokrycia w jego treści.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor w dużej mierze zrealizował postawione zadania badawcze. Zaprojektował i przeprowadził wymagające, siedmiosesyjne badanie podłużne, które w warunkach pandemii zasługuje na uznanie. Zastosował standardowy potok

wstępnego przetwarzania danych (fMRIPrep, SPM12). Mam jednak szereg zastrzeżeń metodycznych:

Opis przetwarzania wstępnego (s. 33–35) jest w dużej mierze przeklejonym szablonem generowanym przez fMRIPrep. Zawiera trzykrotnie powtórzone zdanie „First, a reference volume and its skull-stripped version were generated...” oraz niespójne czasy gramatyczne. Z opisu nie wynika, które dane faktycznie weszły do analizy statystycznej. Autor opisuje wyznaczenie regresorów CompCor, FD, DVARS, oznaczanie ramek z nadmiernym ruchem i odsumowanie ICA-AROMA, a w modelu na poziomie osobniczym (s. 36) uwzględniono jedynie sześć parametrów ruchu. Czy analizowano dane odsumowane ICA-AROMA? Czy obrazy oznaczone jako „motion outliers” były w jakikolwiek sposób wykluczane? Pytanie jest istotne, bo w zadaniach dotykowych ruch palca może generować artefakty ruchowe skorelowane z blokami zadania. Proszę o omówienie poszczególnych elementów opisanego potoku przetwarzania danych, ze wskazaniem, które z zastosowanych metod i narzędzi zostały faktycznie wykorzystane w analizie oraz jaki był ich konkretny cel. Obecny opis sprawia wrażenie w pewnych miejscach mechanicznego zestawienia kolejnych etapów analizy, bez wyjaśnienia ich znaczenia. W szczególności proszę o wyjaśnienie, w jakim celu zastosowano powierzchniowe próbkowanie danych za pomocą funkcji `mri_vol2surf` z pakietu FreeSurfer (s. 35) oraz w jaki sposób wynik tego etapu został wykorzystany w dalszej analizie.

Sygnalizowany już problem definicji VWFA. Kluczowy dla pracy obszar nie został zdefiniowany ani funkcjonalnie (brak lokalizatora), ani jako a priori określony obszar zainteresowania (ROI). Jego obecność jest stwierdzana na podstawie etykiety atlasu AAL („inferior temporal gyrus”) i bliskości maksimum aktywacji do „typowych współrzędnych” (np. s. 67). Wnioski o momencie pojawienia się zaangażowania VWFA (7 dni w zadaniu wzrokowym, ok. 6 tygodni w dotykowym) opierają się więc na tym, czy w danym porównaniu klastr całomózgowy przekroczył próg istotności. To nie jest równoznaczne z wykazaniem zmiany w VWFA. Analiza ROI z niezależnie zdefiniowanym obszarem znacząco wzmocniłaby te wnioski

Opis akwizycji. Parametry sekwencji EPI podane na s. 31 są niepełne i częściowo błędne. Pole widzenia „FoV: 672 x 656 mm” - naprawdę !? Wieloryb?? . Brakuje liczby warstw, współczynnika akceleracji wielowarstwowej (multiband), na którą wskazuje czas TR = 1410 ms przy wokselu 2,5 mm oraz użycie obrazu SBRef, a także kierunku kodowania fazy i liczby objętości w serii. Nie wykonano map pola (field maps). Tekst opisu przetwarzania wspomina o korekcji zniekształceń „when available” (s. 35), co sugeruje, że jej nie przeprowadzono, co w przypadku pracy, której centralne wnioski dotyczą lewej brzusznej kory potyliczno-skroniowej, czyli obszaru szczególnie narażonego na zniekształcenia geometryczne i utratę sygnału w obrazowaniu EPI.

Model statystyczny i progi. Do analizy DD6 z czynnikiem międzygrupowym użyto modelu flexible factorial w SPM12. Wiadomo, że w tym modelu efekty międzygrupowe są testowane z użyciem wewnątrzosobniczego składnika błędu, co może zawyżać ich istotność. Proszę o komentarz. Progi istotności są przy tym niejednolite. W rozdziałach 4–6 stosowano FWE na poziomie woksela z minimalnym rozmiarem klastra 20 wokseli, a w rozdziale 7

„FWE na poziomie klastra z $p = 0,001$ ” (s. 39) i rozmiarem klastra 97 wokseli (s. 114). Opis myli tu próg formowania klastra z poziomem korekcji.

Wyniki nieprzedstawione. Metody opisują zadania poznawcze (Stroop, n-back, s. 29–30), a w dyskusji (s. 107) autor wnioskuje na ich podstawie o braku transferu. Wyników tych zadań nie przedstawiono jednak w części wynikowej. Podobnie w podrozdziale 8.4 pojawia się informacja o wywiadzie po badaniu (debriefing) dotyczącym świadomości ukrytych słów, który nie został opisany w metodach. Twierdzenie z podrozdziału 8.5, że główne obserwacje były „consistent across participants”, nie ma oparcia w żadnej analizie na poziomie osobniczym.

Autor zdaje sobie sprawę z części tych ograniczeń i omawia je w rozdziale 8 (liczebność prób, pasywna grupa kontrolna, niedopasowanie grupy niewidomych, ekologiczna trafność zadań). Świadczy to o jego rzetelności naukowej. Jednocześnie bardziej precyzyjne formułowanie wniosków, niewątpliwie podniosłoby wartość naukową rozprawy. W niektórych miejscach, zarówno w streszczeniu, jak i w dyskusjach wyników przedstawionych w poszczególnych rozdziałach, wnioski są sformułowane bardziej stanowczo, niż uzasadniają to przedstawione wyniki. W szczególności należałoby wyraźniej odróżnić wnioski bezpośrednio wynikające z uzyskanych danych od ich szerszej interpretacji teoretycznej.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Rozprawa wnosi oryginalny wkład w badania nad neuroplastycznością u dorosłych. Oryginalność pracy wynika przede wszystkim z gęstego próbkowania czasowego procesu uczenia się, które obejmuje pierwszy tydzień nauki, z zastosowaniem zadania lingwistycznego. Takiego podejścia nie stosowano we wcześniejszych badaniach, w których pierwsze pomiary wykonywano po około trzech miesiącach. Trudny do oceny jest natomiast samodzielny i oryginalny dorobek autora. Ze względu na zespołowy charakter projektu (publikacja ma dziesięciu współautorów, a w tekście rozprawy konsekwentnie używana jest forma „my”) warto by jednak jednoznacznie wskazać, które elementy pracy (projekt zadań, zbieranie danych, analizy) wykonał osobiście doktorant. Należałoby też wskazać, które rozdziały pokrywają się z opublikowanymi artykułami. Oczywistym jest, że skala prezentowanej części doświadczalnej (liczba badanych osób, liczba sesji obrazowych, koszty) przekracza zakres niniejsze pracy. Proszę o ustosunkowanie się do tej kwestii podczas obrony.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy?

Praca liczy 166 stron, jest wydrukowana jednostronnie na papierze kredowym, co przekłada się na jej wagę (myślę, że ponad 2 kg !). Praca jest napisana poprawną angielszczyzną i ma w miarę przejrzystą strukturę (pytania badawcze, przewidywania, wyniki i dyskusja dla każdego badania). Znaczną część objętości zajmują jednak wielostronicowe tabele lokalizacji maksimów aktywacji.

Przykładowo rozdział 4 obejmuje strony 40–85, z czego dyskusja zajmuje niespełna cztery strony. Tabele te można było przenieść do załącznika, a w tekście głównym przedstawić syntetyczne wykresy przebiegów czasowych w wybranych obszarach. Znacznie ułatwiłoby to odbiór najważniejszego wyniku pracy, czyli dynamiki zmian. Dyskusje poszczególnych rozdziałów są miejscami rozwlekłe i powtarzalne, z dużą liczbą ogólnikowych odwołań do literatury. Zauważyłem też szereg uchybień edycyjnych:

- podpis rys. 8 („Tactile letters reading speed”) umieszczono pod wynikami zadania wzrokowego (s. 44),
- podrozdział 6.2.1.1 zatytułowano „On-site Braille reading tests”, choć dotyczy zadania DD6.

Uchybienia te nie wpływają jednak zasadniczo na ocenę pracy. W efekcie:

Rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571 z póź. zm.). W związku z powyższym, wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Biologii Doświadczalnej o dopuszczenie mgr. Macieja Gacy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.