

**Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu im.
Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku**



Magdalena Prończuk

Spójny tematycznie zbiór artykułów naukowych pod
tytułem:

**Wpływ treningu EEG Biofeedback na czas
reakcji oraz motywację u sportowców**

promotor:
dr hab. Piotr Żmijewski



Gdańsk 2024

Spis treści

1. WPROWADZENIE – TEORETYCZNE PODSTAWY PROBLEMU.....	4
BADAWCZEGO.....	4
1.1 MOTYWACJA.....	4
1.2 CZAS REAKCJI.....	5
1.3 TRENING EEG BIOFEEDBACK	8
1.4 UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU BADAWCZEGO	16
2. CEL BADAŃ I PYTANIA BADAWCZE	17
2.2 PYTANIA BADAWCZE	17
OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE	18
3.1.1 <i>Artykuł 1: The impact of EEG biofeedback training on the athletes’</i>	20
MOTIVATION AND BENCH PRESS PERFORMANCE	20
3.1.2 <i>Artykuł 2: The Effects of EEG Biofeedback Training on Visual.....</i>	23
REACTION TIME IN JUDO ATHLETES.....	23
3.1.3 <i>Artykuł 3: Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex</i> <i>reaction times in examined groups of judo athletes during the.....</i>	25
VIENNA TEST	25
4. WNIOSKI.....	28
5. PODSUMOWANIE	29
6. BIBLIOGRAFIA	31
6.1 WYKAZ RYCIN	39
7.STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM	40
8.SUMMARY	42
9.OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW	44
10.PUBLIKACJE NAUKOWE WCHODZĄCE W SKŁAD ROZPRAWY – KOPIE ARTYKUŁÓW	47

10.1 ARTYKUŁ 1	47
10.2 ARTYKUŁ 2	55
10.3 ARTYKUŁ 3	67

1. Wprowadzenie – teoretyczne podstawy problemu badawczego

1.1 Motywacja

W niniejszym rozdziale omówiono znaczenie motywacji u zawodników podczas wyciskania sztangi leżąc w kontekście tzw. *treningu EEG biofeedback* (trening z zastosowaniem sprzężenia zwrotnego w czasie bieżącym).

Motywacja odgrywa fundamentalną rolę w sporcie. Stanowi siłę napędową zawodników do osiągania coraz to lepszych wyników. W kontekście sportu, motywacja obejmuje nie tylko chęć zwycięstwa, ale również zrozumienie celu, autodyscyplinę, wytrwałość i zdolność do przekraczania własnych granic (Jackson i wsp. 2023). Doniesienia z obszaru psychologii sportu wskazują, że motywacja stanowi nie tylko klucz do indywidualnych sukcesów, ale także kształtuje dynamikę drużynową i długofalowe zaangażowanie sportowców (Vallerand i wsp. 2024).

Poprawa motywacji zawodników może być kluczowa dla osiągnięcia lepszych wyników i ciągłego rozwoju sportowego. Istnieje przynajmniej kilka strategii, które mogą pomóc w zwiększeniu motywacji zawodników, a wybrane obejmują:

- Cele SMART: należy ustalić cele specyficzne, mierzalne, osiągalne, realistyczne i zdefiniowane czasowo. Jasne cele stawiane na krótką i długą metę mogą dostarczyć motywacji do systematycznego treningu i doskonalenia umiejętności,
- Indywidualne podejście: zawodnicy różnią się pod względem cech fizycznych, psychicznych i motywacyjnych. Indywidualne podejście do treningu, uwzględniające silne strony i obszary do poprawy każdego zawodnika, może zwiększyć zaangażowanie i motywację,
- Monitorowanie postępów: regularne śledzenie postępów zawodników może dostarczyć im satysfakcji z osiągniętych wyników. Dodatkowo, analizowanie postępów pozwala na dostosowywanie treningu i ustawianie nowych celów,
- Wsparcie społeczne: zintegrowanie zawodników w pozytywną społeczność treningową może zwiększyć ich motywację. Wspierające relacje z trenerem, innymi zawodnikami i rodziną mogą dostarczyć dodatkowej motywacji i poczucia przynależności,
- Różnorodność treningu: monotonia może prowadzić do spadku motywacji.

Wprowadzanie różnorodności w treningu, zarówno pod względem ćwiczeń, jak i metod, może utrzymać zainteresowanie i zaangażowanie zawodników,

- Trening mentalny: rozwinięcie umiejętności treningu mentalnego, takich jak wizualizacja sukcesu, pozytywne myślenie i kontrola stresu, może wpływać pozytywnie na psychikę zawodników, co z kolei ma wpływ na ich motywację,
- Tworzenie silnego związku emocjonalnego z celem może zwiększyć zaangażowanie i motywację,
- Zarządzanie presją: poznanie przez zawodników technik radzenia sobie z presją i stresem. Trening psychologiczny może pomóc w utrzymaniu motywacji nawet w trudnych sytuacjach,

W kontekście prezentowanych badań, trzy ostatnie strategie zdobywają szczególne zainteresowanie. Rezultaty badań nad motywacją w sporcie wskazują, że pewne osiągnięcia zależą nie tylko od samej intensywności motywacji, lecz także od jej jakości i źródeł. Teorie samostanowienia (Vallerand i wsp. 2000) wskazują, że wewnętrzna motywacja, wynikająca z autentycznego zainteresowania i satysfakcji z wykonywanej czynności, przewiduje lepsze osiągnięcia niż motywacja zewnętrzna, wynikająca z presji czy nagród zewnętrznych. Z kolei, badania nad teorią ustawiania celów (Locke i wsp. 2002) podkreślają istotność klarownie sformułowanych celów w procesie motywacji, które działają jak wewnętrzne sterowniki skupiające uwagę i wysiłek sportowca na konkretne zadania.

W ostatnich latach rozwój technologii, takich jak wykorzystanie EEG w treningach ze sprzężeniem zwrotnym (ang. biofeedback), wprowadza nowe perspektywy do badań nad motywacją w kontekście sportu. Badania nad neurobiologią czasu reakcji mogą zostać wzbogacone poprzez wykorzystanie zaawansowanych technologii obrazowania mózgu, takich jak elektroencefalografia, aby lepiej zrozumieć interakcje między mózgiem a szybkością reakcji.

1.2 Czas reakcji

W niniejszej części omówiono znaczenie czasu reakcji w zawodników judo w kontekście treningu EEG biofeedback. Czas reakcji, będący miarą szybkości i skuteczności reagowania na bodźce zewnętrzne, odgrywa istotną rolę w wielu

dyscyplinach sportowych. Czas reakcji definiuje się jako „miarę czasu, jaki upływa od prezentacji bodźca do momentu, gdy osoba podejmuje reakcję na ten bodziec” (Rosenbaum i wsp. 2009). Krótki czas reakcji może wskazywać na szybką i efektywną zdolność do reagowania na bodźce zewnętrzne, podczas gdy dłuższy czas reakcji może sugerować opóźnienie lub trudność w przetwarzaniu bodźców i podejmowaniu reakcji. Niezależnie czy to sprinter na bieżni (Schmidt i wsp. 2008), tenisista na korcie (Williams i wsp. 2018) czy piłkarz na boisku (Deci i Ryan 2000), umiejętność szybkiego i precyzyjnego reagowania może stanowić kluczową przewagę konkurencyjną. W badaniach naukowych z obszaru psychologii sportu i neurobiologii uwidacznia się, jak istotny wpływ na czas reakcji ma nie tylko genetyka, ale także systematyczne treningi, skoncentrowana uwaga oraz zdolność radzenia sobie ze stresem (Hill i wsp. 2010).

Rezultaty badań (Sterkowicz i wsp. 2009, Lambourne i Tomporowski 2010, Cojocariu 2011) nad czasem reakcji wykazują, że treningi skupione na poprawie tej cechy nie tylko zwiększają szybkość reakcji, ale także wpływają pozytywnie na ogólną jakość technicznego wykonania zadań. Przykładowo, badania nad sprinterami wykazały, że wyspecjalizowane treningi sensoryczne mogą istotnie skrócić czas reakcji, co przekłada się na lepsze starty podczas zawodów (Smith i wsp. 2020).

W obliczu współczesnego życia, naznaczonego nieustannym pędem i dynamicznymi zmianami, pojęcie czasu staje się niezmiernie istotnym elementem, a jego wartość w kontekście sportu jest wręcz nie do przecenienia. W środowisku, gdzie zwycięstwo i porażka mogą zależeć od ułamków sekundy, zagadnienia związane z czasem reakcji oraz motywacją nabierają nie tylko naukowego, ale i praktycznego znaczenia. Jednocześnie postęp technologiczny, szczególnie w obszarze neurobiologii i treningu sportowego, dostarcza nowych narzędzi do zgłębiania tajników umysłu sportowca. W dobie postępującego udziału technologii w życiu codziennym, narzędzia takie jak trening EEG biofeedback stają się nieocenionym wsparciem w badaniach nad czasem reakcji i motywacją w sporcie. Eksploracja neurobiologicznych podstaw czasu reakcji za pomocą zaawansowanych metod obrazowania mózgu, takich jak elektroencefalografia, umożliwia precyzyjne monitorowanie aktywności mózgowej związanej z procesem podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym.

Badania Smitha i wsp. (2020) ukazują, że treningi skoncentrowane na poprawie czasu reakcji przy użyciu EEG biofeedback prowadzą do specyficznych zmian w zakresie aktywności elektrycznej mózgu. Ta technologia pozwala na monitorowanie fal

mózgowych, co pozwala na precyzyjne dostosowanie treningów do indywidualnych cech neurobiologicznych sportowców. W rezultacie, możliwe jest dostosowanie programów treningowych do specyfiki aktywności mózgu danego zawodnika, co może przyczynić się do bardziej efektywnego rozwijania umiejętności reakcji.

W kontekście motywacji, EEG biofeedback również otwiera nowe perspektywy badawcze. Badania nad neurobiologią motywacji przy użyciu tej technologii, takie jak prace Jacksona i wsp. (2023), pozwalają na bezpośrednie obserwowanie zmian w aktywności mózgowej związanej z motywacją sportowca. Możliwość monitorowania procesów neurobiologicznych związanych z nagrodą i przyjemnością podczas treningów może pomóc w dostosowywaniu strategii motywacyjnych do indywidualnych preferencji i potrzeb zawodników.

Ponadto, treningi EEG biofeedback w połączeniu z koncepcją psychologiczną dotyczącą czasu reakcji i motywacji mogą przynieść synergiczne korzyści. Integracja danych neurobiologicznych z wynikami psychologicznymi, opartymi na badaniach Greenberga i Luthara (2020) czy Valleranda i wsp. (2000), pozwala na stworzenie holistycznego podejścia do rozwijania umiejętności reakcji i podtrzymywania wysokiej motywacji sportowców.

W praktyce, treningi EEG biofeedback mogą być dostosowane do konkretnych celów treningowych, uwzględniając zarówno aspekty czasu reakcji, jak i motywacji. Na podstawie wyników badań Zhaa i wsp. (2023) oraz O'Connor i wsp. (2022), które analizują unikalne czynniki motywacyjne w różnych fazach sezonu i w różnych dyscyplinach sportowych, możliwe jest dostosowanie treningów EEG biofeedback do aktualnych potrzeb sportowca, co pozwala na optymalne wykorzystanie potencjału psychologicznego i neurobiologicznego zawodników.

Podsumowując, badania nad czasem reakcji i motywacją w sporcie, wsparte technologią EEG biofeedback, otwierają fascynujące możliwości zrozumienia oraz doskonalenia umiejętności reakcji i motywacji sportowców. Dzięki integracji badań neurobiologicznych i psychologicznych, możliwe jest wypracowanie kompleksowego podejścia do treningów, które uwzględnia indywidualne cechy każdego zawodnika, przyczyniając się do osiągnięcia jeszcze lepszych wyników sportowych.

1.3 Trening EEG biofeedback

Metoda EEG biofeedback pozwala na łączenie ze sobą treningu sfery fizycznej oraz psychicznej, dzięki czemu odnajduje zastosowanie w sporcie (Petruzzello i wsp. 1991). Koncepcją treningową używaną w sporcie jest trening elektroencefalotyczny (EEG) pozwalający na szeroki zakres pracy z zawodnikiem. Zadaniem EEG jest pobudzenie organizmu, zmuszając go do samoregulacji i wytworzenia autonomicznego impulsu, którego celem jest podjęcie odpowiedniej decyzji lub działania, mające bezpośrednie przełożenie na zachowania sportowca podczas zawodów (Petruzzello i wsp. 1991). EEG biofeedback jak każdy inny model treningowy wymaga odpowiedniego doboru protokołu treningowego do wyznaczonych celów.

EEG biofeedback, znane również jako neurofeedback, to technika, w której osoba ucząca się świadomie reguluje swoją aktywność mózgu, korzystając z informacji zwrotnej na temat jej wzorców fal mózgowych. W kontekście poprawy motywacji zawodników, trening EEG biofeedback może wiele kilka korzyści:

1. Dzięki biofeedbackowi zawodnicy mogą lepiej zrozumieć swoje własne stany umysłowe, zwłaszcza te związane z poziomem stresu, koncentracją i relaksem. Świadomość tych stanów może pomóc w identyfikowaniu obszarów do poprawy (Ferguson, K., Hall, 2020).
2. Skuteczny trening biofeedbacku EEG może pomóc w redukcji poziomu stresu u zawodników. Niższy poziom stresu może prowadzić do lepszej wydolności, szybszego regenerowania się i skupienia na celach treningowych (Rydzik i wsp. 2023).
3. Ćwiczenia biofeedbacku EEG skoncentrowane na poprawie koncentracji mogą pomóc zawodnikom utrzymać lepszą uwagę podczas treningów i zawodów. Poprawa koncentracji może przekładać się na lepszą precyzję ruchów podczas trójboju siłowego (Maszczyk i wsp. 2019).
4. Zawodnicy mogą używać biofeedbacku EEG do osiągnięcia optymalnych stanów umysłowych przed treningami lub zawodami. To może obejmować stymulowanie odpowiednich fal mózgowych związanych z energią, motywacją i skoncentrowaniem (Chamera i wsp. 2023).

5. Biofeedback EEG umożliwia dostosowanie treningu do indywidualnych potrzeb zawodników. Każdy może pracować nad konkretnymi obszarami, które są kluczowe dla ich własnej wydolności i motywacji (Chamera i wsp. 2023).
6. Dzięki monitorowaniu fal mózgowych, zawodnicy i trenerzy mogą śledzić postępy w poprawie kontroli nad własnym umysłem. To może działać jako dodatkowa motywacja do ciągłego doskonalenia (Sokhadze i wsp. 2012).
7. Biofeedback EEG można integrować z innymi technikami treningu mentalnego, takimi jak wizualizacja sukcesu, afirmację czy techniki oddechowe. Razem mogą one tworzyć kompleksowy program poprawiający wydolność i motywację (Mikicin i wsp. 2015).

Trening EEG biofeedback to technika, która może być potencjalnie wykorzystywana również do poprawy czasu reakcji zawodników judo poprzez świadomą regulację aktywności mózgu. Zawodnicy judo często doświadczają sytuacji stresowych w trakcie walki. Trening EEG biofeedback może pomóc w skuteczniejszym zarządzaniu poziomem stresu, co może wpłynąć na bardziej optymalne reakcje w sytuacjach dynamicznych. Trening EEG biofeedback może być skoncentrowany na poprawie umiejętności koncentracji zawodników. Skupianie się na odpowiednich falach mózgowych związanych z koncentracją może pomóc w utrzymaniu uwagi na ważnych elementach walki.

Składnik treningu EEG biofeedback może obejmować ćwiczenia, które angażują współpracę między percepcją wzrokową a ruchem (Gruzelier i wsp. 2014, Zoefel i wsp. 2011). To może przyczynić się do szybszej i bardziej precyzyjnej reakcji na bodźce wizualne. Poprawa zdolności do relaksacji w odpowiednich momentach może wpływać na elastyczność myślową i szybkość reakcji. Trening EEG biofeedback może pomóc w rozwijaniu umiejętności relaksacyjnych. Dodatkowo, indywidualne profile EEG zawodników mogą być wykorzystane do dostosowywania treningu do ich konkretnych potrzeb. Każdy zawodnik może pracować nad konkretnymi aspektami czasu reakcji, które wymagają poprawy. Systematyczne monitorowanie zmian w aktywności mózgu zawodników za pomocą EEG biofeedback pozwala śledzić postępy treningowe zawodników. To dostarcza informacji zwrotnej, która może być używana do ciągłego doskonalenia treningu. Na koniec i co bardzo ważne, EEG biofeedback może być

integrowany z tradycyjnym treningiem mentalnym, takim jak wizualizacja sukcesu czy pozytywne myślenie, aby wzmocnić efektywność procesu uczenia się (Gruzelier i wsp. 2014, Zoefel i wsp. 2011)..

W świetle aktualnego piśmiennictwa uwidacznia się, że projektowanie i prowadzenie badań w obszarze zastosowania EEG biofeedback w sporcie wymaga interdyscyplinarnego podejścia. Różnorodność metodologiczna, brak jednolitej definicji motywacji, indywidualne różnice sportowców, ograniczenia długości obserwacji oraz niedostateczna jeszcze analiza kontekstualnej, stanowią pewne wyzwania oraz wymagają zintegrowanego i skoordynowanego podejścia badawczego. Zasadne zatem stało się uwzględnienie wymienionych aspektów przy projektowaniu i prowadzeniu dalszych badań. Umożliwi to bardziej kompleksowe zrozumienie potencjalnych korzyści płynących z treningu EEG biofeedback w kontekście poprawy rozwoju zawodniczego.

Od lat 60-tych XX wieku, kiedy to zrodziła się koncepcja biofeedbacku, znalazł on wszechstronne zastosowanie między innymi w psychologii (Moore i wsp. 2000, Schoenberg i wsp. 2014), w medycynie (Głombiewski i wsp. 2013, Tan i wsp. 2009), ale także w biznesie i w sporcie celem poprawy wyników sportowców (Maszczyk i wsp. 2018, 2020). Jedną z najczęściej stosowanych technik biofeedbacku jest trening biofeedback EEG (elektroencefalografia) czyli neurofeedback (NFB) (Razran, 1961; Rostami i wsp., 2012). NFB jest metodą pomagającą pacjentom w świadomym kontrolowaniu fal mózgowych, gdzie dane zabierane są za pomocą EEG (Marzbani i wsp. 2016).

EEG biofeedback jest bardziej wyrafinowaną formą biofeedbacku. Ten sposób samoregulującej stymulacji z zastosowaniem dedykowanej technologii jest wykorzystywany do przywracania równowagi wzorców funkcjonowania mózgu w celu poprawy wydajności poznawczej, emocjonalnej i behawioralnej (Gong i wsp. 2021; Salimnejad i wsp. 2019). Analiza sygnałów EEG, rejestrowanych za pomocą elektrod umieszczonych na skórze głowy osoby badanej, przyjmuje przystępną dla trenującego postać graficzną, która wyświetlana jest na ekranie monitora, stanowiąc w ten sposób informację zwrotną na temat bieżących zmian zachodzących w jego umyśle. Istotą metody EEG biofeedback jest założenie, że aktywność bioelektryczna mózgu stanowi odzwierciedlenie stanów emocjonalnych badanego, oraz że aktywność tę można kontrolować i modyfikować pod wpływem treningu (Salimnejad i wsp. 2019).

NFB wykorzystuje zmierzone zmiany w aktywacji mózgu, aby pomóc sportowcom regulować aktywność lub moc wyznaczonych pasm częstotliwości EEG, dostarczając im informacji o aktywacji w czasie rzeczywistym (Brito i wsp. 2022; Paret i wsp. 2019). W różnych badaniach wykorzystywano EEG do oceny dynamiki aktywności neuronów w korze mózgowej i wyodrębniono różne fale mózgowe: theta (4–8 Hz), alfa (10–12 Hz), beta (22–15 Hz) i rytm czuciowo-ruchowy (12-15 Hz). Stwierdzono, że fale te mogą być przydatne w osiągnięciu lepszego zrozumienia poprawy procesów poznawczomotorycznych (Wyckoff i wsp. 2015). Przeprowadzone dotąd badania wśród zawodników różnych sportów (np.: golf, tenis, łucznictwo, piłka nożna, judo) wykazały, że kształtowanie umiejętności wytwarzania określonych wzorców aktywności korowej w wyniku zastosowania treningu EEG biofeedback, korzystnie wpływa na zwiększanie ich efektywności, a także osiągnięte przez nich wyniki sportowe (Lee, J. i wsp. 2021; Srilekha i wsp. 2014; Landers i wsp. 1994; Maszczyk i wsp. 2018, 2020).

Siła i moc zawodników są determinowane przez złożoną interakcję różnych czynników, w tym między innymi motywacji, czy obciążenia zewnętrznego. W tej interakcji można uwzględnić oddziaływanie treningu EEG biofeedback. Sposób, w jaki wspomniane czynniki oddziałują na siebie, może mieć istotne konsekwencje dla zdolności sportowca do osiągnięcia najlepszych wyników. W szczególności wpływ różnic w motywacji na osiągnięcia może być znaczący, zwłaszcza w przypadku aktywności o wysokiej intensywności, takich jak podnoszenie ciężarów. Ćwiczenie na ławce płaskiej jest podstawą wielu programów treningowych siły, wytrzymałości czy mocy, wymaga zarówno wysiłku fizycznego, jak i mentalnego, aby zostało wykonane poprawnie.

Motywacja jest to umysłowy stan napięcia, obejmuje on między innymi związek pomiędzy percepcją a myśleniem. W badaniach motywacją określa się wskaźnikiem FAI (Frontal Alpha Asymmetry). FAI może być wykorzystywana jako wskaźnik ukrytych procesów poznawczych i emocjonalnych. Mówiąc o mierzeniu motywacji wiemy, że większa moc alfa w lewej części przedniej mózgu w porównaniu z prawą częścią przednią często jest związana z pozytywnymi emocjami, motywacją do działania i większym zaangażowaniem w bodźce, podczas gdy większa moc alfa w prawej części przedniej mózgu w porównaniu z lewą częścią przednią jest związana z negatywnymi emocjami, motywacją do unikania i zachowaniami ucieczki (Kelly i wsp. 2017). W terminach psychologicznych proces mentalny uważany jest za podstawą jednostkę zaangażowania

w działalność, przekładając się bezpośrednio na jakość i efekt działania, co w przypadku sportu może wpływać na osiągnięcia sportowca (Gracz i wsp. 2007).

Koncentracja odgrywa kluczową rolę w sporcie siłowym, charakteryzującym się tendencją do ciągłego podnoszenia poziomu techniki wykonywanego zadania. Uwaga to proces neuropsychologiczny obejmujący specyficzną koncentrację funkcji poznawczych na określonym zadaniu (Yarrow i wsp. 2009). Sportowcy na poziomie zawodowym doświadczają mniejszej satysfakcji z faz treningowych niż amatorzy, co może być odzwierciedleniem ich zrozumienia podstawowego celu praktyki sportowej. Wystarczająco silna motywacja skoncentrowana na konkretnym celu przy regularnych, często powtarzających się treningach, może być istotnym czynnikiem o charakterze psychologicznym, który wpływa na efekty treningu wysokokwalifikowanych sportowców (Healy i wsp. 1993). Bioelektryczna aktywność mózgu może odzwierciedlać stany umysłowe, w tym przypadku zdolność sportowca do wykonania zadania motorycznego. Aktywność bioelektryczna mózgu jest dynamiczna i może być rozwijana zarówno przez czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne, takie jak stan umysłu sportowca. Elektroencefalografia umożliwia monitorowanie tego procesu. Zmiany w aktywności elektrycznej mózgu są obserwowane w czasie rzeczywistym i obejmują różne zakresy częstotliwości w określonych częściach kory. Są one związane z różnymi stanami emocjonalnymi, w tym z motywacją (Thompson i Thompson 2016; Demo 2019). Czynniki motywacyjny jest bardzo istotny pod względem osiągnięć, zwłaszcza w przypadku postępujących obciążeń u zawodników wyciskających sztangę leżąc. Wyciskanie sztangi na ławce płaskiej to złożone ćwiczenie wielostawowe, które aktywuje kilka grup mięśni górnej części ciała, umożliwiając pokonanie dużych obciążeń zewnętrznych, wymagających wysokiego poziomu aktywacji nerwowo-mięśniowej. Wyniki uzyskiwane przez zawodników w zawodach wyciskania sztangi są głównie efektem rozwiniętych zdolności motorycznych, techniki i zaangażowania (postawy mentalnej). Ze względu na dużą popularność zawodów w tej konkurencji siłowej, jest ona często wykorzystywana w treningu, testowaniu i badaniach naukowych (Baechle i Earle 2008). Kinematyka wyciskania na ławce płaskiej (van den Tillaar, 2010) skuteczność różnych ćwiczeń na siłę i moc mięśni klatki piersiowej (Welsch i wsp. 2005), wpływ niestabilnej powierzchni na aktywację mięśni górnej części ciała (Anderson i Behm 2004), efekty zmęczenia (van den Tillaar i Saeterbakken 2013), a także uwarunkowania motywacyjne ćwiczeń na ławce płaskiej z maksymalnymi i submaksymalnymi obciążeniami były przedmiotem

wcześniejszych badań (Lebon i wsp. 2010; Colquhoun i wsp. 2017; Saeterbakken i wsp. 2017).

W sporcie, takim jak judo, w którym uwaga wizualna oraz jej wkład w proces podejmowania decyzji i planowania właściwej odpowiedzi motorycznej ma kluczowe znaczenie dla powodzenia działań zawodnika, wysoki poziom koncentracji i zdolność do szybkiego reagowania na bodźce wizualne jest szczególnie ważna. Dlatego też wskazanym jest, aby w procesie treningowym judoków dążyć do doskonalenia umiejętności właściwego skupiania uwagi oraz szybkiego jej odzyskiwania po rozproszeniu, aby usprawnić ich mechanizmy przetwarzania wzrokowego oraz poprawić czas reagowania na bodźce (Mirifar i wsp. 2018).

Czas reakcji lub czas odpowiedzi na działanie bodźca odnosi się do czasu, jaki upływa od momentu, w którym coś dostrzeżemy, do momentu, w którym zareagujemy na dany bodziec. Jest wskaźnikiem pozwalającym na ocenę wewnętrznych zasobów poznawczo-motorycznych związanych z wynikami sportowca. Badanie Parsaee i wsp. (2018) oraz Pourbehbahaniego i wsp. (2023), oceniające wpływ treningu NFB na czas reakcji wzrokowej i słuchowej wykazały, że NFB skutecznie poprawia funkcje mózgu w zakresie czasu reakcji wzrokowej i słuchowej (Parsaee i wsp. 2018; Pourbehbahani i wsp. 2023). Celem pracy było poszerzenie dotychczasowej wiedzy dotyczącej skuteczności zastosowania treningów EEG biofeedback na czas reakcji zawodników judo, a także opracowanie optymalnego protokołu treningowego, wykorzystującego EEG oraz określenie optymalnego treningu ze względu na ilości sesji oraz czas ich realizacji istotnie polepszającego czas reakcji badanych judoków.

Trening EEG biofeedback, jest metodą stosowaną w biofeedbacku opierającą się na pomiarze aktywności elektrycznej mózgu. Może być dostosowany do różnych celów, jednak w sporcie wykorzystywany jest pod kątem wszechstronnego rozwoju precyzji i wzorca ruchu. W celu rozwijania tych umiejętności, konieczne jest odpowiednie dostosowanie parametrów treningowych, w tym częstotliwości fali mózgowej, które są najbardziej istotne. Dąży się do optymalizacji treningu EEG biofeedback w zależności od celu:

1. Rozwijanie czucia:

- Fale alfa (8-12 Hz) występują, gdy mózg jest w stanie relaksu i jest związane z lekkim stanem czuwania, ale bez nadmiernej aktywności myślowej. Trening oparty na falach alfa może pomóc w poprawie czujności i skupienia uwagi.

2. Rozwijanie ruchu:

- Fale beta (13-30 Hz) są związane z aktywnością umysłową, koncentracją i działaniami ruchowymi. Trening oparty na falach beta może pomóc w zwiększeniu gotowości ruchowej i poprawieniu koordynacji ruchowej.
- Fale gamma (30-100 Hz) są związane z wysokim poziomem aktywności umysłowej, a także z integracją różnych obszarów mózgu. Mogą pomóc w doskonaleniu precyzji ruchowej i umożliwić bardziej złożone procesy myślowe związane z ruchem.
- Fale Theta (4-7 Hz) i Delta (0,5-4 Hz) są związane z głębokim relaksem i snem. W treningu ruchowym mogą być przydatne w kontekście regeneracji i odpoczynku po intensywnym wysiłku fizycznym.

Podczas treningu siłowego, takiego jak wyciskanie sztangi leżąc, bardziej odpowiednie będzie badanie aktywności fal mózgowych w zakresie fal beta, zwłaszcza w warunkach, które wymagają koncentracji i zaangażowania mentalnego. Fale beta są bowiem, co już zostało wspomniane, związane z aktywnością umysłową, koncentracją i działaniami ruchowymi, co jest istotne podczas wykonywania ćwiczeń siłowych. Dlatego właśnie warto skupić się na analizowaniu fal beta, zwłaszcza w warunkach wymagających intensywnej koncentracji i zaangażowania mentalnego.

Badanie poziomu fal theta (4-7 Hz) w treningu siłowym nie jest typowe, ponieważ fale theta są zazwyczaj związane z głębokim relaksem i stanami umysłu bardziej pasywnymi. Natomiast podczas badania czasu reakcji, szczególnie prostej wydają się jak najbardziej odpowiednie. Szczególnie gdy działanie ma na celu zmniejszenie ich poziomu.

Aby zwiększyć koncentrację i zaangażowanie mentalne, zazwyczaj celem w treningu EEG biofeedback jest zwiększenie poziomu fal beta (13-30 Hz), a nie ich zmniejszenie. Fale beta są związane z aktywnością umysłową, koncentracją, zaangażowaniem i procesami myślowymi, co jest szczególnie ważne w zadaniach wymagających uwagi i skupienia. Dlatego podczas treningu biofeedbacku związanego z koncentracją i zaangażowaniem mentalnym dąży się do zwiększenia amplitudy fal beta (Gruzelier 2024).

Przy zwiększaniu poziomu fal beta można poprawić zdolność skupienia uwagi, poprawić wydajność w zadaniach wymagających koncentracji, zwiększyć zaangażowanie

w działania, a także efektywnie reagować na wyzwania mentalne. Poziom fal beta ma duży wpływ na wszelkie reakcje złożone w założeniu że ich wartość zostaje zwiększona.

Głównym celem procesu treningowego jest maksymalizacja osiągnięć sportowych poprzez doskonalenie umiejętności technicznych i taktycznych sportowców oraz podnoszenie ich poziomu gotowości motorycznej. W tej drodze ku osiągnięciu wysokich wyników sportowych, trening psychologiczny skoncentrowany na poprawie czasu reakcji odgrywa coraz bardziej istotną rolę. Czas reakcji i jego adekwatność są fundamentalnymi predyspozycjami judoki. Dotychczasowe ustalenia naukowe sugerują, że większa wytrzymałość psychiczna sportowca, w tym zdolność do skupienia uwagi pod presją konkurencji, istotnie wpływa na poprawę osiągnięć w trakcie zawodów (Golby i wsp. 2003; Jones i wsp. 2007; Thelwell i wsp. 2010; Nicholls i wsp. 2009).

Wysoka koncentracja i związana z nią zwiększona czujność osiągane w optymalnych warunkach pobudzenia układu nerwowego ułatwiają procesy poznawcze i skracają czasy reakcji (Kaur i wsp. 2006; Rietjens i wsp. 2005; Decroix i wsp. 2016; Le Meur i wsp. 2013). Analiza związku między umiejętnościami samoregulacji sportowców a ich miejscem w światowym rankingu przeprowadzona przez Dupee i wsp. (2015) wykazała, że lepsze zarządzanie fizjologią i emocjami wiąże się z zdecydowaniem z wydajnością sportową. Sportowcy, którzy nie potrafili kontrolować swoich reakcji na stres i ulegali rozproszeniu, zajmowali niższe pozycje w ogólnym rankingu (Dupee i wsp. 2015).

W sportach takich jak judo, w których wzrokowa uwaga i jej wpływ na podejmowanie decyzji oraz planowanie odpowiedzi motorycznej są kluczowe dla sukcesu zawodnika, wysoki poziom koncentracji i zdolność szybkiej reakcji na bodźce wzrokowe są szczególnie istotne. Przeprowadzono liczne analizy (van der Zwan I wsp. 2015, Leher 2014, Vaschillo i wsp. 1998) dotyczące oceny skuteczności treningu EEG biofeedback opartego na samokontroli rytmu serca i częstości oddechów, mającego na celu zwiększenie efektywności działań podjętych przez sportowców.

Wprowadzenie treningu EEG biofeedback wśród elitarnej grupy zapaśników znacząco poprawiło ich czasy reakcji poprzez opanowanie umiejętności utrzymania optymalnego rytmu serca (Vaschillo i wsp. 1998). Podobne wyniki uzyskano w grupie koszykarzy, gdzie trening EEG biofeedback w grupie eksperymentalnej prowadził do znaczącej poprawy czasu reakcji na bodźce w porównaniu do grupy placebo i kontrolnej (Paul i wsp. 2012). W świetle ustaleń dotyczących związku między aktywnością fal

mózgowych, koncentracją oraz wydajnością sportową, metoda EEG biofeedback jawi się jako interesujące narzędzie wspierające rozwój kluczowych umiejętności selektywnej uwagi w sporcie elitarnej. Poprzez umożliwienie sportowcom świadomego monitorowania i regulacji swojej aktywności mózgowej, EEG biofeedback może pomóc w doskonaleniu zdolności koncentracji, co przekłada się na szybsze przetwarzanie bodźców oraz poprawę efektywności ich reakcji w trakcie zawodów.

W związku z powyższym, zastosowanie metody EEG biofeedback w treningu sportowym może być trafnym podejściem do wsparcia rozwoju umiejętności selektywnej uwagi u sportowców, co z kolei może przyczynić się do zwiększenia ich prędkości przetwarzania bodźców oraz efektywności w wykonywaniu zadań sportowych na najwyższym poziomie.

Jednocześnie wydaje się rozsądne dostosowywanie czasu treningu do czasu trwania konkurencji w danej dyscyplinie sportowej lub wydarzeniu sportowym. Biorąc pod uwagę wyżej przytoczone przesłanki, niniejsze badania miały na celu określenie, które fale, Theta czy Beta, są istotnymi predyktorami czasów reakcji prostych i złożonych podczas testu wiedeńskiego, przy użyciu modelowania regresji.

1.4 Uzasadnienie podjęcia tematu badawczego

W sporcie, takim jak judo, w którym uwaga wizualna oraz jej wkład w proces podejmowania decyzji i planowania właściwej odpowiedzi motorycznej ma kluczowe znaczenie dla powodzenia działań zawodnika, wysoki poziom koncentracji i zdolność do szybkiego reagowania na różne bodźce, w tym wizualne, jest szczególnie ważna.

Od lat 60-tych XX wieku, kiedy to zrodziła się koncepcja biofeedbacku, znalazł on wszechstronne zastosowanie między innymi w psychologii, w medycynie, ale także w biznesie i w sporcie celem poprawy wyników sportowców.

Rezultaty niedawnych prac badawczych dostarczyły przesłanek sugerujących, że biofeedback z wykorzystaniem EEG może być jednym z narzędzi wspierających kształtowanie dobrej dyspozycji zawodników w procesie przygotowań do ważnych imprez sportowych (Dupee i wsp. 2016, Jonhson i wsp. 2015)

Badania nad zastosowaniem EEG biofeedbacku w sportach walki stanowią istotne wyzwanie naukowe (Kolayis, i wsp. 2012, Maszczyk i wsp. 2017,2020). Rezultaty

kolejnych badań mogą pozwolić na bardziej zintegrowane podejście w interakcji między kształtowaniem aktywności mózgu a efektywnością procesu szkolenia sportowego. To interdyscyplinarne podejście może prowadzić do nowatorskich metod treningowych, optymalizacji reakcji psychicznych i lepszego zrozumienia mechanizmów wpływających na osiągnięcia w sporcie walki.

Analiza piśmiennictwa skłania do sformułowania tezy, że ma miejsce luka wiedzy w obszarze praktycznego wykorzystania EEG biofeedbacku w sportowym szkoleniu zawodników judo (Maszczyk i wsp. 2017, 2020). Nie jest dostatecznie określone jaki efekt oddziaływania ma motywacja i EEG biofeedback na zdolności wysiłkowe przy zastosowaniu różnych obciążeń u zawodników o różnym poziomie sportowym. W dalszym ciągu poszukuje się optymalizacji procesu treningu z wykorzystaniem EEG biofeedback, w tym ustalenia parametrów sesji treningowych. Na poziomie szczegółowym rozważa się które fale EEG- Theta czy Beta, mogą być istotnymi predyktorami czasów reakcji. Stąd, ze względu na niedostateczny i niespójny stan wiedzy w tym obszarze, niniejsza rozprawa została ukierunkowana na dostarczenie danych, które pozwolą rozstrzygać wyżej sformułowane zagadnienia badawcze.

2. Cel badań i pytania badawcze

2.1 Cel badań

Głównym celem badań prezentowanych w niniejszej dysertacji było określenie wpływu treningu EEG biofeedback na czas reakcji oraz motywację wysoko wytrenowanych zawodników.

2.2 Pytania badawcze

Pytania badawcze sformułowane na potrzeby poszczególnych badań wchodzących w skład niniejszego cyklu:

1. Jakie są efekty oddziaływania treningu EEG biofeedback na wskaźniki motywacji i zdolność wysiłkową podczas wyciskania sztangi leżąc, w zależności od obciążenia zewnętrznego i poziomu wytrenowania u wysokokwalifikowanych zawodników?

2. Czy wpływ programów treningowych z wykorzystaniem EEG biofeedback na czas reakcji będzie zróżnicowany ze względu na częstotliwość sesji i czas trwania sesji u zawodników judo?
3. Które fale, Theta czy Beta, są istotnymi predyktorami czasów reakcji prostych i złożonych wizualnych u zawodników judo?

3. Zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych składających się na osiągnięcie naukowe

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest osiągnięcie naukowe ukierunkowane na oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, przedstawione w postaci trzech spójnych tematycznie prac opublikowanych w czasopismach znajdujących się w wykazach czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa oraz Journal Citation Reports (JCR).

Łączna liczba punktów przypisana opublikowanym artykułom naukowym wynosi:

- **350 punktów** według wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych ogłoszonym przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Komunikat Ministra Nauki z dnia 05 stycznia 2024 roku).
- **8.7 punktów Impact Factor (IF)** według bazy Journal Citation Reports (JCR) z dnia 06.04.2024 r.

Artykuły naukowe składające się osiągnięcie naukowego prezentowane są pod wspólnym tytułem: Wpływ treningu EEG Biofeedback na czas reakcji oraz motywację u sportowców i obejmują następujące prace:

1. **Magdalena Prończuk**, Tomasz Chamera, Jarosław Markowski, Jan Pilch, Wojciech Smółka, Adam Zając, Adam Maszczyk. The impact of EEG biofeedback training on the athletes' motivation and bench press performance. *Biology of Sport*. 2024, Vol. 41, nr 4, s. 1737-1743. Impact Factor: 5.6; MNiSW: 140
2. **Magdalena Prończuk**, Grzegorz Trybek, Artur Terbalyan, Jarosław Markowski, Jan Pilch, Michał Krzysztofik, Maciej Kostrzewa, Aleksandra Mostowik, Adam Maszczyk. The Effects of EEG Biofeedback Training on

Visual Reaction Time in Judo Athletes. *Journal of Human Kinetics*. 2023, Vol. 89, s. 247-258. Impact Factor: 2.3; MNiSW: 140

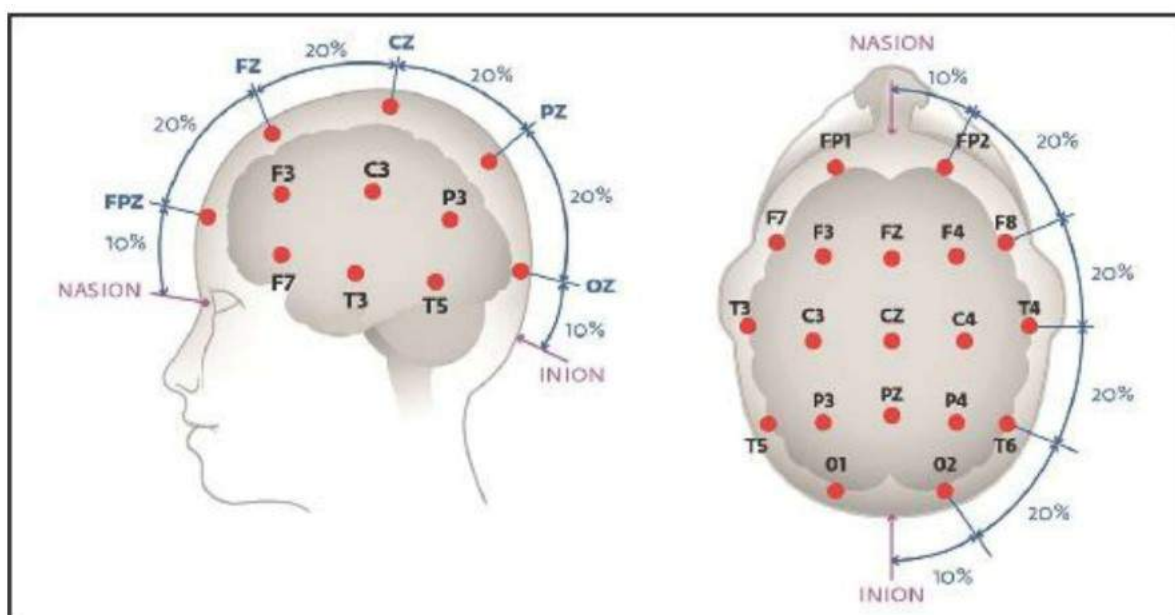
3. **Magdalena Prończuk**, Tomasz Chamera, Alicja Markiel, Jerzy Markowski, Jan Plich, Piotr Żmijewski, Adam Maszczyk. Influence of Beta and Theta Waves as Predictors of Simple and Complex Reaction Times in Examined Groups of Judo Athletes during the Vienna Test. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*. 2023, Vol. 15(4), s. 2-11. Impact Factor: 0.8; MNiSW: 70

3.1.1 Artykuł 1: The impact of EEG biofeedback training on the athletes' motivation and bench press performance

Celem badań sformułowanym w pierwszym artykule było określenie efektów oddziaływania treningu siłowego wspieranego treningiem motywacyjnym i EEG biofeedback na wskaźniki motywacji i zdolność wysiłkową zawodników specjalizujących się w wyciskaniu sztangi leżąc, podczas ćwiczeń na ławce leżąc, z oceną zróżnicowania efektów ze względu na obciążenie zewnętrzne i poziom wytrenowania.

Badaniem objęto 18 zawodników wyciskania sztangi leżąc, którzy zostali podzieleni na dwie grupy: średniozaawansowaną (IG) i zaawansowaną (AG). Sesje treningowe odbywały się co trzy dni, każda trwała 27 minut, obejmując 5×3-minutowe interwały z okresami odpoczynku. W analizie zmian motywacji wykorzystano wskaźniki aktywności mózgu rejestrowane przy pomocy EEG, tj. FAI (Frontal Alpha Asymmetry), a do oceny zdolności wysiłkowej maksymalny ciężar wyciskany przez badanych. W doborze obciążeń wykorzystano wskaźniki relatywne maksymalnego obciążenia w pojedynczym powtórzeniu (tj. % 1RM).

Oddziaływanie treningowe realizowano na punktach Fp1, Fp2 i Cz (zob. rycina 1), promując odpowiednio rytmy beta1 i SMR (rytm sensomotoryczny). SMR jest jednym z obszarów, które mogą być obserwowane i regulowane. Rytm ten można obserwować z zakresie częstotliwości 12-15Hz, a wzrost amplitudy i stabilności rytmu SMR jest często związany z poprawą koncentracji, kontroli ruchowej oraz funkcjonowania poznawczego. U każdego badanego rejestrowano także szczytową częstotliwość alfa (PAF).



Ryc.1 Międzynarodowy system 10-20 Demos, J. N. (2019). *Getting started with EEG neurofeedback*. WW Norton & Company

Pomiary wykonano podczas 5 sesji z 3-minutową przerwą na odpoczynek pomiędzy nimi, aby uniknąć potencjalnych skutków zmęczenia. Sesje polegały na wykonaniu jednego powtórzenia ze sztangą do wyciskania na ławce płaskiej z obciążeniem od 35% ciężaru maksymalnego w pojedynczym powtórzeniu (1RM) do 100% 1RM. Do każdej sesji treningowej zastosowano standardowy protokół rozgrzewki, obejmujący ogólną rozgrzewkę (5 minut) na ręcznym ergometrze rowerowym (tętno około 130 uderzeń na minutę) i ćwiczeń siłowych bez obciążenia zewnętrznego, angażujących całe ciało. Wartość 1RM określono według protokołu Tilliara i Saeterbakkena (2013). 1RM zdefiniowane zostało jako najwyższe obciążenie, z jakim badany wykonał ćwiczenie przy zachowaniu poprawnej techniki, w pełnym zakresie ruchu bez pomocy obecnych asystentów (Seo i wsp. 2012; Wilk i wsp. 2019). Zapisy EEG przeprowadzono zgodnie z procedurami Międzynarodowej Federacji Neurofizjologii Klinicznej i Amerykańskiego Towarzystwa EEG. Zapis EEG rejestrowano przy użyciu elektrod skalpowych AG/AgCl, umieszczonych według międzynarodowego systemu 10–20 (Jaspers 1958). Zapis EEG wykonano na 24-kanalowym systemie Deused Truscan. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1024/s. Impedancja elektrody została utrzymana poniżej 5 kiloomów. Zastosowano filtr sieciowy 50 Hz oraz filtr górnoprzepustowy i dolnoprzepustowy (odpowiednio 1 i 40 Hz). Pomiar rozpoczynano od 2-minutowego

zapisu EEG w stanie spoczynku. Najpierw sprawdzano zapis przy zamkniętych oczach pod kątem padaczkowych wzorców elektroencefalograficznych lub innych nieprawidłowości. Pozostałą część nagrania i całą analizę przeprowadzono z otwartymi oczami. Piętnaście sekund przed każdą próbą wyciskania na ławce zadaniem badanego było skupienie się i zmotywowanie do wykonania zadania. Przerwy odpoczynku pomiędzy seriami wynosiły 5 minut. Przeanalizowano 15-sekundowe odcinki nagrania przed próbą z elektrod F3 i F4 i ręcznie podzielono je na 1-sekundowe epoki. Usunięto te, które wykazywały artefakty spowodowane dodatkową współwystępującą aktywnością mięśni. Wynik średni poddano szybkiej transformacji Fouriera. Eksportowano moc widmową (μV^2) w zakresie alfa (8–13 Hz). Na koniec moc alfa elektrod EEG F3 i F4 przekształcono logarytmicznie i obliczono wynik asymetrii czołowej alfa, odejmując wartość w punkcie F3 od wartości w punkcie F4. W związku z tym dla każdej fazy koncentracji przed podniesieniem sztangi obliczono wskaźnik czołowej asymetrii alfa (FAI) według wzoru zaproponowanego przez Coana i Allena (2003).

Wieloczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) wykazała istotne zróżnicowanie wskaźników FAI ze względu na poziom obciążenia zewnętrznego oraz w odpowiedzi na zrealizowany program treningowy. Odnotowano także istotne różnice w przebiegu wspomnianych zmian ze względu na poziom zaawansowania zawodników (AG vs IG). W grupie AG wykazano istotne różnice wskaźnika FAI między 65%1RM, a 35%1RM, a w grupie IG między 35%1RM, a 50%, 65% i 80%1RM. Wykazano, że istotnym czynnikiem warunkującym efekty treningu siłowego z wykorzystaniem EEG biofeedback jest poziom zaawansowania treningowego zawodników. Stwierdzono, że im sportowiec skuteczniej wykorzystuje motywację, tym bardziej efektywny jest trening siłowy. W rezultacie można oczekiwać lepszych rezultatów sportowych.

Zebrane w niniejszym badaniu doświadczenia skłaniają do stwierdzenia, że EEG biofeedback może być przydatnym w procesie szkolenia sportowego narzędziem do wspierania funkcji mózgu w treningu siły.

3.1.2 Artykuł 2: The Effects of EEG Biofeedback Training on Visual Reaction Time in Judo Athletes

Celem badań sformułowanym w drugim artykule było określenie czy wpływ programów treningowych z wykorzystaniem EEG biofeedback na czas reakcji będzie zróżnicowany ze względu na częstotliwość sesji i czas trwania sesji u zawodników judo?

W badaniu wzięło udział 24 zawodników kadry narodowej Polskiego Związku Judo. Wybraną grupę losowo podzielono na dwie podgrupy: eksperymentalną i kontrolną. Badanie przeprowadzono w czterech cyklach różniących się częstotliwością i czasem trwania sesji neurofeedbacku (NFB), zarówno w grupie kontrolnej, jak i eksperymentalnej. Pierwszy cykl treningowy składał się z 15 sesji szkoleniowych, prowadzonych co drugi dzień, a każda sesja trwała 10 min. W drugim cyklu badawczym wzrosła częstotliwość sesji treningowych, natomiast czas trwania każdej sesji uległ skróceniu. Sesje szkoleniowe odbywały się codziennie, a każda sesja trwała 4 minuty. W trzecim cyklu badawczym treningi odbywały się codziennie, jednak ich czas trwania został wydłużony do 10 min. Ostatecznie czwarty cykl badawczy składał się z 4minutowych sesji szkoleniowych odbywających się co drugi dzień. Wszystkie cztery cykle badawcze przeplatane były czterotygodniową przerwą. Podczas każdej sesji treningowej we wszystkich cyklach dokładnie monitorowano procent czasu spędzonego powyżej progu. Próg ten zwiększono w przypadku fal wzmocnionych i w dół w przypadku fal zahamowanych. Wpływ treningu NFB na czas reakcji wzrokowej zawodników judo oceniano za pomocą komputerowych prostych i złożonych testów czasu reakcji wraz z wybranymi próbami Vienna Test System (VTS).

Trening EEG biofeedback wykonywany był przy użyciu oprogramowania Biograf Infiniti 6.0 oraz 5 – kanałowego urządzenia dekodującego ProComp5 z sensorem EEG, pozwalającego na odbiór wysokiej jakości sygnału o niskiej zawartości szumów. Jakość urządzenia potwierdzona została certyfikatem ISO oraz certyfikatem medycznym CE. Przed przystąpieniem do rejestracji sygnału EEG każdorazowo sprawdzano poziom impedancji elektrod oraz międzyelektrodowy za pomocą wbudowanego czujnika impedancji. Warunkiem rozpoczęcia diagnozy oraz treningu EEG biofeedback było uzyskanie poziomu impedancji poniżej 5 k Ω oraz pomiaru między elektrodami różniącego się od siebie nie więcej niż o 1 k Ω .

Każda sesja treningowa w poszczególnych cyklach została poprzedzona wykonaniem 3minutowej jednokanałowej diagnozy EEG z trzema odprowadzeniami o podłączeniu referencyjnym. W tym czasie osoba badana proszona była o wykonanie następujących czynności: pozostawanie w pozycji siedzącej z oczami otwartymi przez okres jednej minuty, pozostawanie w pozycji siedzącej z oczami zamkniętymi przez okres jednej minuty, pozostawanie w pozycji siedzącej z oczami otwartymi z dodatkowym zadaniem aktywizującym w postaci odliczania od tyłu co 7 od 100. W czasie diagnozy elektroda referencyjna umieszczana była na lewym płatku ucha, uziemienie na prawym, a elektroda aktywna w punkcie Cz, zgodnie z międzynarodowym systemem 10 – 20 (zob.ryc.1). Podczas treningu EEG biofeedback natomiast elektroda aktywna umieszczana była w punkcie C3, co umożliwiło realizację głównego celu szkolenia, jakim było kształtowanie zdolności utrzymywania optymalnej równowagi pomiędzy czynnością fal szybkich (beta) oraz fal wolnych (theta), odpowiedzialnych za osiąganie stanu koncentracji oraz skupienia przez zawodnika. W trakcie każdej sesji EEG biofeedback kontrolowany był również procent czasu powyżej progu, stanowiący główną miarę postępu badanego, co umożliwiło optymalizację poziomu trudności treningu dla każdego zawodnika.

W rezultacie prezentowanego badania odnotowano, że:

1. Największą poprawę czasów reakcji uzyskano w przypadku zadań o charakterze złożonym, co wskazuje na dużą skuteczność treningu EEG biofeedback w doskonaleniu tej zdolności.
2. Największą efektywność treningu EEG biofeedback w doskonaleniu czasów reakcji złożonej zaobserwowano w wyniku przeprowadzenia czterominutowych sesji szkoleniowych o zmniejszonej częstotliwości, natomiast dziesięciominutowy trening o zwiększonej częstotliwości okazał się najkorzystniejszą konfiguracją w przypadku doskonalenia szybkości reakcji prostej.

3.1.3 Artykuł 3: Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test

Celem tego badania było sprawdzenie które fale, Theta czy Beta, są istotnymi predyktorami czasów reakcji prostych i złożonych wizualnych u zawodników judo? W badaniu wzięło udział 24 zawodników judo, wybranych metodą doboru mieszanego (celowego i losowego). Badanie przeprowadzono w dwóch cyklach, zróżnicowanych pod względem częstotliwości, ale o takim samym czasie trwania sesji EEG biofeedbacku, zarówno w grupie kontrolnej, jak i eksperymentalnej. Pierwszy cykl badania składał się z 15 sesji odbywających się co drugi dzień. Każda sesja treningowa trwała 4 minuty i była modyfikacją treningu Dupee (2016). Druga seria badań, która odbyła się po sześciotygodniowej przerwie, była modyfikacją programu szkoleniowego Thompsona (2008), charakteryzującą się większą częstotliwością spotkań (codziennie), przy czym czas trwania jednej sesji szkoleniowej pozostał taki sam jak w poprzednim cyklu, tj. 4 minuty. Podczas każdej sesji monitorowano procent czasu powyżej progu, który korygowano w górę lub w dół dla fal wzmocnionych i hamowanych, tak aby poziom trudności treningu był optymalny i dostosowany do indywidualnych postępów każdego sportowca. Podstawowym protokołem treningowym w grupie eksperymentalnej był trening beta1/theta, stosowany w celu zwiększenia koncentracji i uzyskania tzw. „zawężenia uwagi” u sportowców. Wpływ treningu neurofeedbacku na szybkość reakcji wzrokowej zawodników judo zweryfikowano na wybranych próbkach z Vienna Test System (VTS).

Wszyscy ochotnicy byli zdrowi i zostali poinstruowani, aby na 12 godzin przed badaniem unikali przyjmowania leków, alkoholu i substancji (takich jak kofeina i napoje energetyczne).

Dodatkowo, na 24 godziny przed badaniem, zalecono wszystkim ochotnikom, aby wstrzymali się od wyczerpujących ćwiczeń oporowych. Uczestnicy poinformowani o protokole badania, potencjalnym ryzyku i korzyściach płynących z badania, a następnie otrzymali pisemną informację zgodę na udział w badaniach. Trening EEG biofeedback przeprowadzono przy użyciu urządzenia EEGDigiTrack MultiEEG_32, którego jakość

została potwierdzona certyfikatami ISO i CE. Przed rejestracją sygnału EEG sprawdzano poziom impedancji poszczególnych elektrod i poziomów międzyelektrodowych czas za pomocą wbudowanego czujnika impedancji. Aby rozpocząć diagnostykę EEG biofeedbacku i treningu konieczne było osiągnięcie poziomu impedancji poniżej 5 k Ω . Następnym krokiem było sprawdzenie czy między elektrodami pomiary różnią się nie więcej niż o 1 k Ω . Każda sesja treningowa w każdym cyklu była poprzedzona 3minutową diagnostyką jednokanałową. W tym czasie uczestnicy zostali poproszeni o wykonanie następujących zadań: usiąść, otwórz oczy na jedną minutę, usiądź z zamkniętymi oczami na jedną minutę, usiądź z otwartymi oczami z dodatkowym zadaniem aktywacji odliczania o 7 ze 100. Podczas odniesienia elektrody diagnozy, elektrodę referencyjną przymocowano do lewego płatka ucha, elektrodę uziemiającą przymocowano według międzynarodowego badania, do prawego płatka ucha i elektrody aktywnej w punkcie Cz, zgodnie z system 10–20 (zob.ryc.1). Podczas treningu EEG Biofeedback do elektrody aktywnej przymocowano elektrodę aktywną dla punktu C3, pozwalający na osiągnięcie głównego celu treningowego (wykształcenie umiejętności utrzymania optymalnej równowagi pomiędzy działaniem fal szybkich (beta) i wolnych (theta). Podczas każdej sesji biofeedbacku EEG procent czasu powyżej progu, tj. główny miernik postępów, był także monitorowany w celu optymalizacji poziomu trudności treningu każdego sportowca. Zarejestrowane sygnały filtrowano w zakresie od 2 do 40 Hz. Wszystkie sygnały zostały sprawdzone wizualnie przez eksperta, a okresy wolne od artefaktów wybrano ręcznie i poddano dalszej analizie. Informacje zwrotne na podstawie aktywności zarejestrowanej przez elektrodę C3 przedstawiono w formie wizualnej i formie słuchowej. Podczas szkolenia uczestnicy zostali poproszeni o kontrolę wyświetlanych obrazów na ekranie komputera tak, aby wyświetlany samolot cały czas leciał. Samolot był w ruchu, spełniając następujące warunki: amplitudy theta (4–7,5 Hz) i pasma beta2 (20–30 Hz) pozostały poniżej ustalonego progu, a amplitudy SMR (12–15 Hz) i beta1 (13–20 Hz) utrzymywały się powyżej ustalonego progu. Skutecznemu ruchowi samolotu towarzyszył wzmacniający sygnał akustyczny.

Wyniki tego badania wskazują, że fale Theta są istotnymi ($p=0.001$) predyktorami czasów reakcji prostych i złożonych wizualnych u zawodników judo. Wyniki analizy regresji pokazały, że zmienne Theta miały istotny wpływ na czas reakcji w badanej grupie eksperymentalnej. Oznacza to, że aktywność fal Theta w mózgu judoków może być

kluczowym czynnikiem determinującym szybkość reakcji zarówno na bodźce proste, jak i złożone. Natomiast fale Beta, chociaż również wykazały istotność statystyczną, miały mniejszy wpływ na czas reakcji w porównaniu do fal Theta.

Badania wykazały, że sportowcy z grupy eksperymentalnej w wyniku wdrożenia protokołu beta1/theta istotnie statystycznie poprawili czas reakcji prostych i złożonych po każdym cyklu treningowym. Podobnych zmian nie zaobserwowano w grupie kontrolnej. Wyniki sugerują, że trening neurofeedbacku może znacząco poprawić umiejętności reakcji w kontekście sportowym. Jednak dla pełniejszego zrozumienia i potwierdzenia tych efektów konieczne są dalsze dobrze kontrolowane badania.

4. Wnioski

W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów i analiz w prezentowanym monotematycznym cyklu publikacji niniejszej dysertacji, sformułowano następujące wnioski:

1. Motywacja zawodników zaawansowanych poprawiła się szczególnie podczas pokonywania obciążenia 100% 1RM po zastosowaniu treningu EEG biofeedback. Wyniki badania sugerują, że zastosowany protokół treningu EEG biofeedback może być skuteczną metodą poprawy motywacji podczas wykonywania wysiłku fizycznego, szczególnie u zawodników zaawansowanych..
2. Najlepszą efektywność treningu EEG biofeedback w poprawie czasów reakcji złożonych zaobserwowano po przeprowadzeniu sesji szkoleniowych trwających 4 minuty, wykonywanych co drugi dzień. Natomiast w przypadku czasów reakcji prostych najkorzystniejszym okazał się trening trwający 10 minut. Oznacza to, że skuteczność treningu EEG biofeedback może zależeć od częstotliwości sesji oraz ich czasu trwania.
3. Wyniki wskazują, że fale theta są lepszym predyktorem czasów reakcji złożonych w treningach o większej częstotliwości, podczas gdy fale beta lepiej przewidyują czas reakcji w treningach o mniejszej częstotliwości. Oznacza to, że skuteczność treningu EEG biofeedback w poprawie czasów reakcji może być związana z rodzajem fal mózgowych i częstotliwością treningów.

5. Podsumowanie

Reasumując stwierdzono, iż trening EEG biofeedback może być skutecznym narzędziem do wspierania treningu siłowego, zwłaszcza w kontekście poprawy motywacji. Zwiększenie poziomu fal Beta korzystnie wpływa na czas reakcji złożonej po sesjach EEG biofeedback o mniejszej częstotliwości (co drugi dzień) niż większej częstotliwości (codzinnie). Natomiast zmniejszenie poziomu fal Theta korzystnie wpływa na czas reakcji prostej, bez zasadniczej różnicy względem częstotliwości treningów EEG biofeedback.

Z ostrożności należy podkreślić, że wnioski te odnoszą się jedynie do badanych grup zawodników, wszelkie uogólnienia byłyby zasadne po przeprowadzeniu badań na większą skalę, z udziałem zawodników innych sportów i z uwzględnieniem specyficznego kontekstu szkoleniowego. Co ważne, treningi EEG biofeedback mają charakter osobniczy i w bardzo dużej części zależą od indywidualnych umiejętności i predyspozycji sportowców. Zatem w praktyce trenerskiej powinny być dostosowane indywidualnie do poszczególnych zawodników, w celu uzyskania jak najlepszego efektu.

Poza prezentowanymi wnioskami o charakterze poznawczym, warto podkreślić spostrzeżenia natury aplikacyjnej. W rezultacie niniejszych badań pojawiła się przesłanka wskazująca na potrzebę dostosowania protokołów treningowych do konkretnych celów poprawy czasów reakcji. Rezultaty niniejszych badań sugerują, że efektywność treningu EEG biofeedback w poprawie czasów reakcji może zależeć zarówno od częstotliwości sesji, jak i ich czasu trwania. Sesje treningowe trwające 4 minuty, wykonywane co drugi dzień, okazały się najbardziej skuteczne w poprawie czasów reakcji złożonych, podczas gdy dla czasów reakcji prostych najlepszym okazał się trening trwający 10 minut.

Wyniki prezentowanych badań wskazują na istotną poprawę motywacji u zawodników zaawansowanych podczas wykonywania wysiłku fizycznego po zastosowaniu treningu EEG biofeedback. Dla zawodników średniozaawansowanych efekt ten wydaje się być bardziej naturalny, wynikający z doświadczenia. Jest to ważna obserwacja, sugerująca, że trening EEG biofeedback może być szczególnie skuteczny w poprawie motywacji wśród zawodników na wyższym poziomie zaawansowania.

Prezentowane badania sugerują także, że skuteczność treningu EEG biofeedback w poprawie czasów reakcji może być związana z doбором rodzaju fal mózgowych i

częstotliwością treningów. Fale theta okazały się lepszym predyktorem czasów reakcji złożonych w treningach o większej częstotliwości, podczas gdy fale beta lepiej przewidują czas reakcji w treningach o mniejszej częstotliwości. Ta obserwacja może być kluczowa przy projektowaniu spersonalizowanych programów treningowych opartych na EEG biofeedback.

Doświadczenia przy realizacji niniejszych badań sugerują także, nowe kierunki dalszych badań. Istotnym kierunkiem dalszych badań może być:

1. Ocena skuteczności treningu EEG biofeedback w grupie sportowców o niskim poziomie zaawansowania. Porównanie efektów treningu na różnych poziomach zaawansowania może dostarczyć cennych informacji na temat potencjalnych korzyści i ograniczeń tej metody dla różnych grup.

2. Określenie długoterminowych efektów oddziaływania treningu EEG biofeedback na motywację i czasy reakcji. Monitorowanie zmian parametrów w ciągu dłuższego czasu niż tygodni może dostarczyć głębszego zrozumienia trwałego wpływu tej metody na osiągnięcia sportowe. Nie jasne także, jak długo utrzymują się osiągnięte rezultaty.

3. Określenie wpływu treningu EEG biofeedback na czas reakcji u elitarnych zawodników judo w warunkach hipoksji normobarycznej i normoksji, które mogą stanowić istotny wkład w zrozumienie adaptacji fizjologicznych oraz psychologicznych zachodzących w organizmie sportowców podczas treningu w różnych warunkach atmosferycznych. Wyniki takiego badania mogą przyczynić się do opracowania bardziej spersonalizowanych protokołów treningowych, uwzględniających specyficzne potrzeby i warunki sportowców, co mogłoby przynieść korzyści nie tylko dla osiągnięć sportowych, ale także dla ogólnego zdrowia i kondycji zawodników. Ponadto, porównanie efektów treningu w warunkach hipoksji i normoksji może dostarczyć cennych wskazówek dotyczących optymalnego wykorzystania treningu EEG biofeedback w różnych kontekstach, co może mieć znaczenie nie tylko dla środowiska sportowego, ale także dla innych dziedzin, takich jak rehabilitacja czy terapia.

Podsumowując, prezentowane badania dostarczają istotnych informacji na temat potencjalnych korzyści treningu EEG biofeedback dla poprawy motywacji i czasów reakcji u sportowców, jednocześnie wskazując na potrzebę dalszych badań, aby lepiej zrozumieć i wykorzystać tę metodę w praktyce sportowej.

6. Bibliografia

1. Anderson, K. G., & Behm, D. G. (2004). Maintenance of EMG activity and loss of force output with instability. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(3), 637-664.
2. Anderson, R., Hanrahan, S. J., & Mallett, C. J. (2014). Investigating the optimal psychological state for peak performance in Australian elite athletes. *Journal of Applied Sport Psychology*, 26, 318-333.
3. Baechle, T. R., & Earle, R. W. (Eds.). (2008). *Essentials of strength training and conditioning*. Human kinetics.
4. Brito, N. H., Werchan, D., Brandes-Aitken, A., Yoshikawa, H., Greaves, A., & Zhang, M. (2022). Paid maternal leave is associated with infant brain function at 3 months of age. *Child development*, 93(4), 1030-1043.
5. Brown, H., et al. (2016). "The Role of Psychological Factors in Athletic Success: A Comprehensive Analysis." *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 22(4), 189-205.
6. Chamera, T., Prończuk, M., Markowski, J., Pilch, J., Kostrzewa, M., & Kowalczyk, M. (2023) Wpływ wybranych treningów EEG Biofeedback na szybkość reakcji wzrokowej zawodników judo.
7. Chen, L., Wang, X., & Li, Y. (2022). Integrated model of reaction time in sports performance: A psychophysiological approach. *Frontiers in Psychology*, 13, 618721.
8. Christie S., Werthner P. (2015). Prestart Psychophysiological Profile of a 200-m Canoe Athlete: A Comparison of Best and Worst Reaction Times. *Biofeedback*, 43(2), 73-83.
9. Coan JA, Allen JJB. Frontal EEG asymmetry and the behavioral activation and inhibition systems. *Psychophysiol*. 2003; 40(1):106–114.
10. Cojocariu A., Honceriu C. The effect of the specific training upon the values of the choice reaction time at the level of the upper limbs in the lawn tennis (16 –18 – year – old). *Revista Sport si Societate*. 2011; 79: 79 – 84.

11. Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227-268.
12. Decroix, L., Piacentini, M. F., Rietjens, G., & Meeusen, R. (2016). Monitoring physical and cognitive overload during a training camp in professional female cyclists. *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 933-939.
13. Dupee M., Werthner P. (2011). Managing the stress response: The use of bio/neurofeedback with Olympic level athletes. *Biofeedback*, 39(3), 92-94.
14. Dupee M., Werthner P., Forneris T. (2015). A preliminary study on the relationship between athletes' ability to self-regulate and world ranking. *Biofeedback*, 43(2), 57-63.
15. Dupee, M., Forneris, T., & Werthner, P. (2016). Perceived Outcomes of a Biofeedback and Neurofeedback Training Intervention for Optimal Performance: Learning to Enhance Self-Awareness and Self- Regulation With Olympic Athletes. *The Sport Psychologist*, 30(4), 339–349.
16. Eckner J. T., Kutcher J. S., Richardson J. K. (2010). Pilot evaluation of a novel clinical test of reaction time in National Collegiate Athletic Association Division I football players. *Journal of Athletic Training*, 45, 327-332.
17. Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations—signalling the status quo?. *Current opinion in neurobiology*, 20(2), 156-165.
18. Engelbregt, H. J., Keeser, D., Van Eijk, L., Suiker, E. M., Eichhorn, D., Karch, S., ... & Pogarell, O. (2016). Short and long-term effects of sham-controlled prefrontal EEGneurofeedback training in healthy subjects. *Clinical Neurophysiology*, 127(4), 1931-1937.
19. Gardner, F. (2009). Efficacy, mechanisms of change and the scientific development of sport psychology. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 3(2), 139-155.
20. Glombiewski, J. A., Bernardy, K., & Häuser, W. (2013). Efficacy of EMG-and EEGbiofeedback in fibromyalgia syndrome: A meta-analysis and a systematic review of randomized controlled trials. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013.
21. Golby, J., Sheard, M., & Lavallee, D. (2003). A cognitive-behavioural analysis of mental toughness in national rugby league football teams. *Perceptual and Motor Skills*, 96(2), 455-462.

22. Gong, R., Wegscheider, M., Mühlberg, C., Gast, R., Fricke, C., Rumpf, J. J., ... & Classen, J. (2021). Spatiotemporal features of β - γ phase-amplitude coupling in Parkinson's disease derived from scalp EEG. *Brain*, 144(2), 487-503.
23. Gould, D., Dieffenbach, K., & Moffett, A. (2002). Psychological characteristics and their development in Olympic champions. *Journal of Applied Sport Psychology*, 14(3), 172-204.
24. Gould, D., & Maynard, I. (2009). Psychological preparation for the Olympic games. *Journal of Sport Sciences*, 27, 1393-1408.
25. Greenberg, D., & Luthar, S. (2020). Psychological factors influencing reaction time in elite athletes: A comprehensive review. *Journal of Applied Sport Psychology*, 32(3), 235-251.
26. Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimizing performance. II: Creativity, the performing arts and ecological validity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 142-158.
27. Healy, A. F., Clawson, D. M., McNamara, D. S., Marmie, W. R., Schneider, V. I., Rickard, T. C., ... & Bourne Jr, L. E. (1993). The long-term retention of knowledge and skills. In P. R. K. Zimmerman & S. B. Smith (Eds.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 30, pp. 135-164). Academic Press.
28. Hill, D. M., Hanton, S., & Matthews, N. (2010). A qualitative exploration of choking in elite golf. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 4(3), 221-240.
29. Jackson, C., White, M., & Brown, H. (2023). Neurobiological foundations of motivation in sports: An integrative perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 682219.
30. Jaspers, H. H. (1958). The ten 20 electrodes system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
31. Johnson, K., & Davis, R. (2015). Neurofeedback as a Tool for Enhancing Sports Performance: A Meta-Analysis. *Journal of Applied Neurology*, 18(3), 56-72.
32. Jones, R., Smith, K., & Williams, P. (2021). Biomechanical analysis of reaction time in elite sprinters. *Journal of Sports Biomechanics*, 20(2), 189-201.

33. Kaur, P., Paul, M., & Sandhu, J. S. (2006). Auditory and visual reaction time in athletes, healthy controls, and patients of type I diabetes mellitus: A comparative study. *International Journal of Diabetes in Developing Countries*, 26, 112–115.
34. Kelley, N. J., Hortensius, R., Schutter, D. J., & Harmon-Jones, E. (2017). The relationship of approach/avoidance motivation and asymmetric frontal cortical activity: A review of studies manipulating frontal asymmetry. *International Journal of Psychophysiology*, 119, 19-30.
35. Krane, V., & Williams, J. M. (2006). Psychological characteristics of peak performance. In J. M. Williams (Ed.), *Applied sport psychology: Personal growth to peak performance* (5th ed., pp. 207–227).
36. Lambourne, K., & Tomporowski, P. (2010). The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A meta-regression analysis. *Brain Research*, 1341, 12–24.
37. Lee, J. Y., Jang, J. H., Choi, A. R., Chung, S. J., Kim, B., Park, M., ... & Choi, J. S. (2021). Neuromodulatory effect of transcranial direct current stimulation on restingstate EEG activity in internet gaming disorder: A randomized, double-blind, shamcontrolled parallel group trial. *Cerebral Cortex Communications*, 2(1), 1-11.
38. Lehrer, P. M., & Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: How and why does it work?. *Frontiers in Psychology*, 5, 756.
39. Locke, E. A., & Latham, G. P. (2002). Building a practically useful theory of goal setting and task motivation: A 35-year odyssey. *American Psychologist*, 57(9), 705– 717.
40. Le Meur, Y., Hausswirth, C., Natta, F., Couturier, A., Bignet, F., & Vidal, P. P. (2013). A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *Journal of Applied Physiology*, 114(3), 411-420.
41. Marzbani, H., Marateb, H., & Mansourian, M. (2016). Uwaga metodologiczna: Neurofeedback: Kompleksowy przegląd projektowania systemów, metodologii i zastosowań klinicznych. *Podstawowy klin. Neurologia*, 7, 143–158. doi:10.15412/J.BCN.03070208.
42. Maszczyk, A., Dobrakowski, P., Nitychoruk, M., Żak, M., Kowalczyk, M., & Toborek, M. (2020). The effect of neurofeedback training on the visual processing efficiency in judo athletes. *Journal of Human Kinetics*, 71, 219.

43. Maszczyk, A., Gołaś, A., Pietraszewski, P., Kowalczyk, M., Ciężczyk, P., Kochanowicz, A., ... & Zając, A. (2018). Neurofeedback for the enhancement of dynamic balance of judokas. *Biology of Sport*, 35(1), 99-102.
44. Maszczyk, A., Dobrakowski, P., Żak, M., Gozdowski, P., Krawczyk, M., & Małecki, A. et al. (2019). Differences in motivation during the bench press movement with progressive loads using EEG analysis. *Biology of Sport*, 36(4), 351-356.
45. Mikicin, M., Orzechowski, G., Jurewicz, K., Paluch, K., Kowalczyk, M., & Wróbel, A. (2015). Brain-training for physical performance: a study of EEG-neurofeedback and alpha relaxation training in athletes. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 75(4), 434445.
46. Mirifar, A., Villasana, F., Ehrlenspiel, F., & Beckmann, J. (2018). Effects of unilateral dynamic handgrip on brain oscillatory activity in range of 8-12 Hz: A replication study. *Psychophysiology*, 55, e13262.
47. Moore, N. C. (2000). A review of EEG biofeedback treatment of anxiety disorders. *Clinical Electroencephalography*, 31(1), 1-6.
48. Nelson Ferguson, K., & Hall, C. (2020). Sport Biofeedback: Exploring Implications and Limitations of Its Use. *The Sport Psychologist*, 34(3), 232-241. Retrieved May 9, 2024,
49. Nicholls, A. R., Polman, R. C., Levy, A. R., & Backhouse, S. H. (2009). Mental toughness in sport: Achievement level, gender, age, experience, and sport type differences. *Personality and Individual Differences*, 47(1), 73-75.
50. O'Connor, W., Smith, G., & Robinson, M. (2022). Dynamic changes in athletes' motivation across the competitive season: A longitudinal study. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 44(1), 32-45.
51. J. N., Hendler, T., Linden, D., & Kadosh, K. C. (2019). Current progress in real-time functional magnetic resonance-based neurofeedback: Methodological challenges and achievements. *NeuroImage*, 202, 116107.
51. Parsaei, F., Maleki, A., & Daliri, M. R. (2018). An automated approach for quantifying emotional conditions based on electroencephalogram signals. *Journal of Isfahan Medical School*, 35(458), 1732-1737.

52. Paul, M., Garg, K., & Singh Sandhu, J. (2012). Role of biofeedback in optimizing psychomotor performance in sports. *Asian Journal of Sports Medicine*, 3(1), 29–40.
53. Petruzzello, S. J., Landers, D. M., & Salazar, W. (1991). Biofeedback and sport/exercise performance: Applications and limitations. *Behavior Therapy*, 22(3), 379–392.
54. Pourbehbahani, Z., Saemi, E., Cheng, M. Y., & Dehghan, M. R. (2023). Both sensorimotor rhythm neurofeedback and self-controlled practice enhance motor learning and performance in novice golfers. *Behavioral Sciences*, 13(1), 65.
55. Ravizza, K. (2006). Increasing awareness for sport performance. In J. M. Williams (Ed.), *Applied sport psychology: Personal growth to peak performance* (pp. 228–239). Human Kinetics.
56. Razran, G. (1961). The observable unconscious and the inferable conscious in current Soviet psychophysiology: Interoceptive conditioning, semantic conditioning, and the orienting reflex. *Psychological Review*, 68, 1–147.
57. Rietjens, G. J., Kuipers, H., Adam, J. J., Saris, W. H., van Breda, E., van Hamond, D., & Keizer, H. A. (2005). Physiological, biochemical and psychological markers of strenuous training-induced fatigue. *International Journal of Sports Medicine*, 26(1), 16–26.
58. Rietjens, M., & Steenbergen, P. A. (2005). Crosslinking mechanism of boric acid with diols revisited.
59. Rosenbaum, D. A. (2009). *Human motor control*. Academic Press.
60. Rostami, H. R., Arastoo, A. A., Nejad, S. J., Mahany, M. K., Malamiri, R. A., & Goharpey, S. (2012). Effects of modified constraint-induced movement therapy in virtual environment on upper-limb function in children with spastic hemiparetic cerebral palsy: A randomized controlled trial. *NeuroRehabilitation*, 31(4), 357–365.
61. Rydzik, Ł., Wąsacz, W., Ambroży, T., Javdaneh, N., Brydak, K., & Kopańska, M. (2023). The Use of Neurofeedback in sports Training: systematic review. *Brain Sciences*, 13(4), 660.
62. Saeterbakken, A. H., Mo, D. A., Scott, S., & Andersen, V. (2017). The effects of bench press variations in competitive athletes on muscle activity and performance. *Journal of Human Kinetics*, 57, 61–71.

63. Salimnejad, Z., Zandi, H., & Arsham, S. (2019). Effect of bio-neural feedback exercises on the performance of female Rugby players. *International Journal of Motor Control and Learning*, 1(2), 10–18.
64. Seo, D.-I., Kim, E., Fahs, C. A., Rossow, L., Young, K., Ferguson, S. L., ... & So, W.Y. (2012). Reliability of the one-repetition maximum test based on muscle group and gender. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(2), 221–225.
65. Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2008). Motor learning and performance: A situation-based learning approach. *Human Kinetics*.
66. Schoenberg, P. L., & David, A. S. (2014). Biofeedback for psychiatric disorders: A systematic review. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 39, 109–135.
67. Smith, J., Brown, A., & Johnson, M. (2019). Neural correlates of reaction time training in athletes: A multimodal neuroimaging study. *Journal of Sports Science*, 37(5), 537–544.
68. Sokhadze, E. “Tato.” (2012). Peak Performance Training Using Prefrontal EEG Biofeedback. *Biofeedback*, 40(1), 7–15. doi:10.5298/1081-5937-39.3.4
69. Sterkowicz, S., Lech, G., Jaworski, J., & Ambroży, T. (2012). Coordination motor abilities of judo contestants at different age. *Journal of Combat Sports and Martial Arts*, 1(2), 5–10.
70. Tan, G., Thornby, J., Hammond, D. C., Strehl, U., Canady, B., Arnemann, K., & Kaiser, D. A. (2009). Meta-analysis of EEG biofeedback in treating epilepsy. *Clinical EEG and Neuroscience*, 40(3), 173–179.
71. Thelwell, R. C., Such, B. A., Weston, N. J., Such, J. D., & Greenlees, I. A. (2010). Developing mental toughness: Perceptions of elite female gymnasts. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 8(2), 170–188.
72. Thompson, G. A., & White, L. M. (2017). Cognitive training and its impact on reaction times in sports: A comprehensive review. *Sports Medicine - Open*, 10(4), 125–142.
73. Thompson, L., & Thompson, M. (2005). Neurofeedback intervention for adults with ADHD. *Journal of Adult Development*, 12, 123–130.
74. Thompson, M., & Thompson, L. (2016). Current practice of neurofeedback: Where we are and how we got there. *Biofeedback*, 44(4), 181–205.

75. Thompson, M., & Thompson, L. (2003). *The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology*. Wheat Ridge, CO: Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback.
76. Thompson, M., & Thompson, L. (2003). *The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology*. Wheat Ridge, CO: Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback.
77. Van den Tillaar, R., & Saeterbakken, A. H. (2013). Fatigue effects upon sticking region and electromyography in a six-repetition maximum bench press. *Journal of Sports Science*, 31, 1823–1830.
78. Vallerand, R., Pelletier, L., & Koestner, R. (2000). Deci and Ryan's self-determination theory: A view from the hierarchical model of intrinsic and extrinsic motivation. *Psychological Inquiry*, 11(4), 312–318.
79. Vallerand, R., Pelletier, L., & Koestner, R. (2024). Autonomous motivation in sport: A self-determination theory perspective. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 36(1), 1–13.
80. Van Den Tillaar, R., & Ettema, G. (2010). The “sticking period” in a maximum bench press. *Journal of Sports Sciences*, 28(5), 529–535. Van Den Tillaar, R., & Saeterbakken, A. H. (2013). Fatigue effects upon sticking region and electromyography in a sixrepetition maximum bench press. *Journal of sports sciences*, 31(16), 1823-1830.
81. Van der Zwan, J. E., de Vente, W., Huizink, A. C., Bögels, S. M., & de Bruin, E. I. (2015). Physical activity, mindfulness meditation, or heart rate variability biofeedback for stress reduction: a randomized controlled trial. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 40(4), 257–268.
82. Vaschillo E.G., Vysochin Y. V., Rishe N. RSA biofeedback as an effective relaxation method.
83. Van der Zwan, J. E., de Vente, W., Huizink, A. C., Bögels, S. M., & de Bruin, E. I. (2015). Physical activity, mindfulness meditation, or heart rate variability biofeedback for stress reduction: A randomized controlled trial. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 40(4), 257–268.
84. Vaschillo, E. G., Vysochin, Y. V., & Rishe, N. (1998). RSA biofeedback as an effective relaxation method. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 23(2), 136–137.

85. Wang, J., & Li, Y. (2023). Sport-specific motivational factors: A qualitative analysis across different sports. *Psychology of Sport and Exercise*, 24, 98.
86. Williams, C., & Johnson, P. (2018). Enhancing sports performance through neurofeedback: Current trends and future directions. *International Journal of Sports Science*, 15(2), 78–96.
87. Wyckoff, S. N., Sherlin, L. H., Ford, N. L., & Dalke, D. (2015). Validation of a wireless dry electrode system for electroencephalography. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 12(1), 1–9.
88. Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: The neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(8), 585–596.
89. Zoefel, B., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2011). Neurofeedback training of the upper alpha frequency band in EEG improves cognitive performance. *NeuroImage*, 54(2), 1427–1431.

6.1 Wykaz rycin

Ryc. 1 International 10-20 System (Demos, J. N. (2019). *Getting started with EEG neurofeedback*. WW Norton & Company)

7. Streszczenie w języku polskim

Podstawowym celem procesu treningowego jest maksymalizacja osiągnięć sportowych poprzez między innymi doskonalenie umiejętności technicznych i taktycznych sportowców oraz podnoszenie poziomu motorycznej gotowości zawodników. W tym procesie coraz większą uwagę trenerów i badaczy skupia trening mentalny. Taki trening realizowany jest często w połączeniu z wykorzystaniem elektroencefalografii (EEG) ze zwrotnym sprzężeniem, stąd nazwa treningu tego EEG biofeedback. Dotychczasowe ustalenia naukowe sugerują, że większa wytrzymałość fizyczna i pośrednio psychiczna sportowca, w tym ich zdolność do koncentracji uwagi pod presją konkurencji, znacząco wpływa na poprawę wyników podczas zawodów (Anderson i wsp. 2014; Chen i wsp. 2022; Christie i wsp. 2015; Dupee i wsp. 2011). Wysoka koncentracja uwagi (skupienia się na określonym zadaniu) i powiązana z nią podwyższona czujność (gotowość do zareagowania na bodźce zewnętrzne) osiągnięta w optymalnych warunkach pobudzenia układu nerwowego, mogą usprawnić procesy poznawcze i skrócić czas reakcji (Dupee i wsp. 2015; Dupee i wsp. 2016; Eckner i wsp. 2010; Engel i wsp. 2010). Przy tym, nie można pomijać osobniczych predyspozycji przyswajania nowych umiejętności. Wprowadzanie nowoczesnych technik zarządzania pobudzeniem w ramach treningu mentalnego zawodników, takich jak szkolenie metodą EEG biofeedback oraz opracowanie optymalnych protokołów treningowych zwiększających potencjał zawodników może stanowić istotny wkład w rozwój dotychczasowej bazy narzędzi stosowanych w dziedzinie psychologii sportu. Przeprowadzone do tej pory badania wskazują, że sportowcy w wyniku treningu EEG biofeedback mogą nauczyć się generowania i utrzymywania określonej aktywności neuronalnej mózgu.

Podsumowując, osiągnięcia sportowe są determinowane przez złożoną interakcję różnych czynników, w tym motywacji, treningu i obciążenia zewnętrznego. Sposób, w jaki te czynniki oddziałują na siebie, może mieć istotne konsekwencje dla zdolności sportowca do osiągania najlepszych wyników. W szczególności wpływ różnic w motywacji na osiągnięcia może być znaczący, zwłaszcza w przypadku aktywności o wysokiej intensywności, takich jak podnoszenie ciężarów. Ćwiczenie na ławce płaskiej jest podstawą wielu programów treningowych siły i kondycji, wymaga zarówno wysiłku fizycznego, jak i mentalnego, aby zostać wykonane poprawnie.

Przedstawione w niniejszej dysertacji trzy prace empiryczne zmierzały do określenia możliwości poprawy motywacji oraz czasu reakcji poprzez zastosowanie ukierunkowanego treningu EEG biofeedback. W tym celu, jedno z badań ukierunkowane było na określenie wpływu treningu EEG biofeedback na motywację zawodników trójboju siłowego podczas ćwiczenia wyciskania na ławce w zależności od obciążenia zewnętrznego i poziomu wytrenowania. W kolejnym badaniu oceniano wpływ treningu EEG na czas reakcji zawodników kardy narodowej judo, a także podjęto działania ukierunkowane na opracowanie optymalnego protokołu treningu EEG pod względem liczby sesji i czasu ich trwania. Natomiast, głównym celem trzeciego prezentowanego badania, było określenie, które fale Theta czy Beta, są istotnymi predyktorami czasów reakcji prostych i złożonych w Wiedeńskim Systemie Testów.

Wspólnym mianownikiem tych badań było zastosowanie technologii EEG biofeedbacku w kontekście poprawy zarówno motywacji, jak i czasów reakcji prostej i złożonej sportowców. Ostatecznym celem było określenie efektów oddziaływania metody biofeedbacku EEG na wybrane cechy zdolności do rywalizacji i treningu sportowego. Badania ukierunkowane zostały na także na określenie związków między aktywnością mózgu a psychologicznymi oraz fizycznymi aspektami osiągnięć sportowych.

W pierwszym badaniu celem pracy było określenie wpływu treningu EEG biofeedback na motywację i wydolność zawodników trójboju siłowego podczas ćwiczenia wyciskania na ławce, w zależności od obciążenia zewnętrznego i poziomu wytrenowania.

Celem drugiej publikacji było, sprawdzenie która z wybranych modyfikacji treningu EEG biofeedback będzie skuteczniej kształtować czas reakcji w treningu zawodników judo pod kątem czasu trwania jednostki treningowej dla zawodników judo klasy mistrzowskiej.

Celem trzeciej publikacji było sprawdzenie, które z fal, Theta czy Beta to istotne predyktory wizualnych czasów reakcji prostych i złożonych podczas testu wiedeńskiego, wykorzystujące modelowanie regresyjne.

Podsumowując trzy wyżej omówione badania można stwierdzić, że trening EEG biofeedback może być skutecznym narzędziem do wspierania treningu siłowego, zwłaszcza w kontekście poprawy motywacji. Zwiększenie poziomu fal Beta korzystnie wpływa na czas reakcji złożonej po sesjach EEG biofeedback o mniejszej częstotliwości (co drugi dzień) niż większej częstotliwości (codziennie). Natomiast zmniejszenie poziomu fal Theta korzystnie wpływa na czas reakcji prostej, bez zasadniczej różnicy względem częstotliwości treningów EEG biofeedback.

8.Summary

The primary goal of the training process is to maximize athletic achievements by refining the technical and tactical skills of athletes and enhancing their level of motor readiness. In order to achieve increasingly better sports results, mental training plays a growing role, primarily through improvements in endurance and reaction times. This is often implemented in conjunction with EEG biofeedback training. Existing scientific findings suggest that greater physical endurance and indirectly, the mental resilience of athletes, including their ability to concentrate under competitive pressure, significantly impact performance improvement during competitions (Anderson et al. 2014; Chen et al. 2022; Christie et al. 2015; Dupee et al. 2011). High concentration and the associated heightened alertness achieved under optimal conditions of nervous system arousal can enhance cognitive processes and reduce reaction times (Dupee et al. 2015; Dupee et al. 2016 ; Eckner et al. 2010; Engel et al. 2010).

Of course, individual predispositions for acquiring new skills cannot be overlooked at this point. Introducing modern arousal management techniques within the mental training of athletes, such as EEG biofeedback training and the development of optimal training protocols to enhance the potential of athletes, can contribute significantly to the evolution of the existing tools used in the field of sports psychology. Studies conducted thus far indicate that athletes can learn to generate and maintain specific brain neuronal activity through EEG biofeedback training.

In summary, athletic achievements are determined by the complex interaction of various factors, including motivation, training, and external stress. The way these factors interact can have significant consequences for an athlete's ability to achieve optimal results. In particular, the impact of differences in motivation on performance can be significant, especially in highintensity activities such as weightlifting. Bench press exercise is fundamental to many strength and conditioning training programs, requiring both physical and mental effort to be executed correctly.

The three empirical studies presented in this dissertation aimed to determine the potential improvement of motivation and reaction time through the application of targeted EEG biofeedback training. One study focused on assessing the impact of EEG biofeedback training on the motivation of powerlifting athletes during bench press exercises, considering external load and training level. In another study, the influence of EEG training on the reaction time of

national judo athletes was evaluated, and an attempt was made to develop an optimal EEG training protocol in terms of the number of sessions and their duration. Meanwhile, the main goal of the third presented study was to determine which Tetra or Beta brainwaves are significant predictors of simple and complex reaction times during the Vienna test.

The common denominator of these studies was the application of EEG biofeedback technology to improve both psychological (motivation) and physical (simple and complex reaction time) aspects in athletes. The ultimate aim was to understand how these methods could contribute to optimizing training and athletic achievements. The studies sought to identify connections between brain activity and psychological as well as physical aspects of athletic achievements. In the first study, the aim of the study was to determine the effect of EEG biofeedback training on the motivation and performance of powerlifting athletes during bench press exercises, depending on the external load and training level.

The aim of the second publication was to check which of the selected modifications of EEG biofeedback training will be more effective in shaping the reaction time in the training of judo players in terms of the duration of a training unit for champion-class judo players.

The aim of the third publication was to check which of the waves, Theta or Beta, are significant predictors of visual simple and complex reaction times during the Vienna test, using regression modeling.

Summarizing the three studies discussed above, it can be concluded that EEG biofeedback training can be an effective tool to support strength training, especially in the context of improving motivation. Increasing the level of Beta waves has a positive effect on complex reaction time after EEG biofeedback sessions with lower frequency (every other day) than with higher frequency (daily). However, reducing the level of Theta waves has a positive effect on simple reaction time, with no significant difference compared to the frequency of EEG biofeedback training.

9. Oświadczenia współautorów



SZKOŁA DOKTORSKA

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW PUBLIKACJI

Prończuk, M., Chamera, T., Markowski, J., Pilch, J., Smółka, W., & Zajac, A. et al. (2024). The impact of EEG biofeedback training on the athletes' motivation and bench press performance. *Biology of Sport*, 41(3), 97-104. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2024.127065>

Niniejszym oświadczamy, że indywidualny wkład w powstanie ww publikacji jest następujący:

autor	wkład %	opis*	podpis
Magdalena Prończuk	65%	A,B,E,F	<i>Prończuk</i>
Tomasz Chamera	10%	A	<i>Chamera</i>
Jarosław Markowski	5%	B	<i>Markowski</i>
Jan Pilch	5%	B	<i>Pilch</i>
Wojciech Smółka	5%	G	<i>Smółka</i>
Adam Zajac	5%	D	<i>Zajac</i>
Adam Maszczyk	5%	C	<i>Maszczyk</i>

* A – przygotowanie projektu badania, B – przeprowadzanie badań, C – analiza statystyczna, D – interpretacja wyników, E – przygotowanie publikacji, F – opracowanie piśmiennictwa, G – pozyskanie funduszy

Prończuk
podpis doktoranta

[Signature]
podpis promotora



OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW PUBLIKACJI

Prończuk, M., Trybek, G., Terbalyan, A., Markowski, J., Pilch, J., Krzysztofik, M., Kostrzewa, M., Mostowik, A., & Maszczyk, A. (2023). The Effects of EEG Biofeedback Training on Visual Reaction Time in Judo Athletes. *Journal of human kinetics*, 89, 247–258. <https://doi.org/10.5114/jhk/174272>

Niniejszym oświadczamy, że indywidualny wkład w powstanie ww publikacji jest następujący:

autor	wkład %	opis*	podpis
Magdalena Prończuk	70%	A,B,E,F	
Grzegorz Trybek	3%	B	
Artur Terbalyan	4%	A	
Jarosław Markowski	3%	B	
Jan Pilch	3%	G	
Michał Krzysztofik	8%	D	
Maciej Kostrzewa	2%	G	
Aleksandra Mostowik	2%	F	
Adam Maszczyk	5%	C	

* A – przygotowanie projektu badania, B – przeprowadzanie badań, C – analiza statystyczna, D – interpretacja wyników, E – przygotowanie publikacji, F – opracowanie piśmiennictwa, G – pozyskanie funduszy

podpis doktoranta

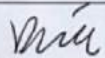
podpis promotora



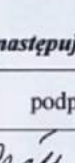
OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW PUBLIKACJI

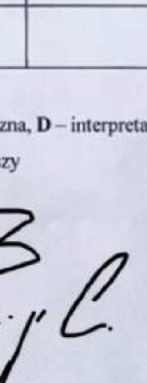
Pronczuk, M., Chamera, T., Markiel, A., Markowski, J., Pilch, J., Żmijewski, P., & Maszczyk, A. (2023). Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 15(4), 7.

Niniejszym oświadczamy, że indywidualny wkład w powstanie ww publikacji jest następujący:

autor	wkład %	opis*	podpis
Magdalena Prończuk	65%	A,B,E,F	
Tomasz Chamera	5%	A	
Alicja Markiel	7%	B	
Jerzy Markowski	5%	B	
Jan Pilch	5%	G	
Piotr Żmijewski	8%	F,D	
Adam Maszczyk	5%	C	

* A – przygotowanie projektu badania, B – przeprowadzanie badań, C – analiza statystyczna, D – interpretacja wyników, E – przygotowanie publikacji, F – opracowanie piśmiennictwa, G – pozyskanie funduszy


podpis doktoranta


podpis promotora

10. Publikacje naukowe wchodzące w skład rozprawy – kopie artykułów

10.1 Artykuł 1

Original Paper

DOI: <https://doi.org/10.5114/biolSport.2024.127065>

© Institute of Sport – National Research Institute

The impact of EEG biofeedback training on the athletes' motivation and bench press performance

AUTHORS: Magdalena Prończuk¹, Tomasz Chamera², Jarosław Markowski³, Jan Pilch⁴, Wojciech Smółka³, Adam Zajac¹, Adam Maszczyk¹

¹ Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland

² Faculty of Physical Culture, Gdańsk University of Physical Education and Sport, Poland

³ Department of Laryngology, Faculty of Medical Sciences, Medical University of Silesia in Katowice, Poland

⁴ Department of Physiological and Medical Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland

ABSTRACT: The objective of this paper was to determine the impact of EEG-biofeedback training on the motivation and efficiency of powerlifters during the bench press exercise in relation to the external load and the level of training. The study included 18 trained powerlifters who were divided into the intermediate (IG) and the advanced (AG) groups. EEG-biofeedback training was conducted every three days, lasting 27 minutes each time (5 × 3-minute intervals with recovery periods – lying on a bench – between them 4 × 3 minutes), and ended with a final EEG measurement in the second cycle of research. The repeated measures ANOVA showed intra-group differences due to external loading for the FAI (Frontal Alpha Asymmetry) obtained in the EEG both before and after biofeedback training. In AG group analysis revealed significant differences between 65%1RM and 35%1RM. In the IG group between 35%1RM and 50, 65 and 80%1RM. One of the major variables influencing the efficiency of strength training, including bench press workouts, is the level of training. The more successfully an athlete uses motivation when exercising, the better their training, which translates into greater results and a lower chance of injury.

CITATION: Prończuk M, Chamera T, Markowski J et al. The impact of EEG biofeedback training on the athletes' motivation and bench press performance. *Biol Sport*. 2024;41(3):97–104.

Received: 2023-03-14; Reviewed: 2023-09-27; Re-submitted: 2023-10-23; Accepted: 2023-11-10; Published: 2024-01-02.

Corresponding author:

Adam Maszczyk
Institute of Sport Sciences
The Jerzy Kukuczka Academy of
Physical Education, Katowice,
Poland
E-mail:
a.maszczyk@awf.katowice.pl

ORCID:

Magdalena Prończuk
0009-0005-1478-3151

Chamera Tomasz
0000-0002-6542-2154

Jarosław Markowski
0000-0003-3416-7354

Jan Pilch
0000-0002-2682-4708

Wojciech Smółka
0000-0003-6546-9962

Adam Zajac
0000-0001-9562-5621

Adam Maszczyk
0000-0001-9139-9747

Key words:

EEG biofeedback
Bench press
Motivation

INTRODUCTION

Athletic strength is determined by a complex interaction of various factors, including motivation, EEG-biofeedback training, and external load. The way in which these factors affect each other can have significant implications for an athlete's ability to perform at their best. In particular, the impact of differences in motivation on performance can be substantial, especially when it comes to high-intensity activities such as weightlifting. The bench press exercise is a staple in many strength and conditioning programs, and it requires both physical and mental effort to perform correctly.

The link between perception and thinking expresses motivation as a certain mental state of tension. In psychological terms, a mental process, is the foundation of involvement in activities, translating directly into the quality and effect of action, which, in the case of sports, can influence the athlete's performance [1]. Concentration plays a crucial role in strength sports, which are characterized by a tendency to continually enhance the level of technique of the performed task. Attention is a neuropsychological process consisting of a specific concentration of cognitive functions on a particular task or the precise awareness of active inputs [2]. Athletes at the professional level experience less satisfaction from the training phases, which may be

a reflection of their understanding of the fundamental goal of sports practice. Sufficiently strong motivation focused on a specific objective in an era of regular, frequently repetitive training, is a crucial psychological factor impacting elite training [3]. The brain's bioelectrical activity may reflect mental states, including, in the case of sports, the athlete's capacity to perform a motor task. The bioelectrical activity of the brain is dynamic and can be influenced by both external and internal factors, such as the athlete's mental state. Electroencephalography is able to monitor this process (EEG). Changes in brain electrical activity are seen in real-time, and distinct frequency ranges in specific parts of the cortex. They are associated with a variety of emotional states, including motivation [4, 5]. The motivational factor is very significant in terms of performance, especially with progressive loads in powerlifters. Bench press (BP) is a complicated multi-joint exercise that activates several upper-body muscle groups, allowing to lift large external loads that demand a high level of neuromuscular activation. One of the most popular powerlifting events is the bench press because it is a separate competition in which the world championships are held. The results produced by strongmen in this competition are mostly the product of developed motor

abilities, technique, and dedication (mental attitude). Due to the strength-building potential of the bench press and the popularity of bench press competitions, it is frequently utilized for training, testing, and research [6]. Bench press kinematics [7], the effectiveness of various chest exercises [8], the impact of an unstable surface on upper body muscle activation [9], effects of fatigue [10], and motivational analysis of BP exercises with maximum and submaximal loads have been the subject of previous research [11, 12, 13].

Training athletes' motivation can be associated with various aspects of brain functioning, including those related to EEG (electroencephalography) and FAI (functional asymmetry of the brain). FAI refers to differences in electrical activity between the two hemispheres of the brain. A typical phenomenon measured in FAI is the asymmetry of activity between the left and right hemispheres. Research in the field of sports psychology suggests that athletes' motivation may be related to the asymmetry of brain activity, especially in areas related to emotions and reward processing. Some studies suggest that greater activity in the left hemisphere of the brain may be associated with higher motivation and positive emotions, while greater activity in the right hemisphere may be associated with negative emotions and lower motivation [3,4,5].

In the context of training athletes' motivation, monitoring FAI using EEG can be useful for understanding which training strategies are most effective for a specific athlete. If an athlete shows lower motivation and greater activity in the right hemisphere of the brain, coaches can focus on strategies aimed at balancing this brain activity through training techniques that may promote greater activity in the left hemisphere of the brain, such as positive reinforcement, visualization of success, or relaxation techniques [2,3]. In this way, tracking FAI through EEG can be a diagnostic tool in sports psychology, helping to tailor training strategies to the individual needs and brain characteristics of the athlete, which can lead to improvements in their motivation and sports achievements [2,3,4,5].

Resuming, athletic performance is determined by a complex interaction of various factors, including motivation, training, and external load. The way in which these factors affect each other can have significant implications for an athlete's ability to perform at their best. In particular, the impact of differences in motivation on performance can be substantial, especially when it comes to high-intensity activities such as weightlifting. The bench press exercise is a staple in many strength and conditioning programs, and it requires both physical and mental effort to perform correctly.

Therefore, the aim of this study was to determine the impact of EEG-biofeedback training on the motivation and efficiency of powerlifters during bench press exercises in relation to the external load and training level.

MATERIALS AND METHODS

Participants

The study included 20 trained powerlifters with a minimum of 4 years of training experience (± 0.5 years) and 20 powerlifters with at least

7 years of training experience (± 0.5 years). Age 24 ± 0.5 years and right-handedness were additional criteria for inclusion in the research groups (scores above 35 points on a scale of 39 points) [14]. Russkam expresses 29 moods and emotions with three levels of intensity [15]. Based on the results of the Russkams set, we removed four athletes (two from each group) from further testing. We made this decision whenever the participant marked feeling at least one of the negative emotions at the highest level. Two study groups were formed as a consequence of the random selection of every second competitor from each list for the appropriate tests: the intermediate group (IG $n = 9$) and the advanced group (AG $n = 9$) (Table 1). The participants were informed orally and in writing about the experimental methodology, and the potential of withdrawal at any time, and provided written consent to take part in the study. EEG was used to conduct the measurements in the Laboratory of Psychomotor Fitness and the Laboratory of Muscular Strength and Power at the Academy of Physical Education in Katowice. The University Bioethics Committee for Research (7/2016 for NRSA 4 040 54) approved the research.

Research procedures

EEG measurements were conducted after a 72-hour break from any weightlifting exercises. The studies were conducted in two cycles. Individual measurement cycles were conducted over a 12-day period (each), with 3 athletes per day. The interval between cycles was 8 weeks. The first cycle of research included an initial EEG measurement based on the amount of external load. Next, biofeedback training was conducted for each athlete individually for a period of 8 weeks (15 biofeedback training sessions). We trained on Fp1, Fp2 and Cz points, promoting beta1 and SMR rhythms respectively. For each competitor, we also checked the peak alpha frequency (PAF). The frequency ranges did not require correction.

Motivational training was conducted every three days, lasting 27 minutes each time (5×3 -minute intervals with recovery periods – lying on a bench – between them 4×3 minutes), and ended with a final EEG measurement in the second cycle of research.

EEG Measurement

The EEG recordings were conducted according to the procedures of the International Federation of Clinical Neurophysiology and the American EEG Society. The EEG was recorded using AG/AgCl scalp electrodes, placed according to the international 10–20 system [16]. The EEG recording was made on a 24-channel Deused Truscan system. The sampling frequency was 1024/s. Electrode impedance was maintained below 5 kilohms. A 50 Hz mains filter and a high and low-pass filter (respectively 1 and 40 Hz) were used. The grounding electrode was placed on the ear. An airplane cushion pillow was placed on the bench to reduce muscle artifacts on the neck. The measurement started with a 2-minute EEG recording at rest. First, the recording with closed eyes was checked due to epileptiform electroencephalographic patterns or other abnormalities. The rest of the recording and the entire analysis were performed with open eyes.

The impact of EEG biofeedback training

Fifteen seconds before each bench press, attempt the subject's task was to focus and motivate on the task. The rest intervals between sets were 5 minutes. 15-s segments of the recording before the attempt from electrodes F3 and F4 were analyzed and manually divided into 1-s parts epochs. Those showing artifacts from additional co-occurring muscle activity were removed. The average result was subjected to the Fast Fourier Transform. Spectral power (μV^2) at the alpha range (8–13 Hz) was exported. Finally, the alpha power of EEG electrodes F3 and F4 was log-transformed and the asymmetry score of frontal alpha was calculated by subtracting the value at F3 from the value at F4. Therefore, the Frontal Alpha Asymmetry Index (FAI) was calculated for each concentration phase before lifting the barbell according to the formula proposed by Coan and Allen [17].

Each EEG recording was assessed by a neurologist certified by the Polish Society of Clinical Neurophysiology, who was blinded for the subjects.

The Bench press procedures

The measurements were taken in 5 sessions with a 3-minute rest interval between them to avoid potential effects of fatigue. The sessions consisted of performing one repetition of a flat bench press barbell with weights ranging from 35% of one repetition maximum (1RM) to 100% 1RM. A standard warm-up protocol was applied for each session, including a general warm-up (5 minutes) on a hand-cranked cycle ergometer (heart rate at around 130 beats per minute) and several strength exercises without external load that engaged the upper and lower body. The 1RM value was determined according to the Tiliar and Saeterbakken [10] protocol. The protocol included a "free" barbell press on a horizontal bench. When approaching the barbell press, the participants lay on their backs with EEG connected, their heads resting on an inflatable pillow, their trunk supported on the bench, their knees bent at a right angle at the knee joint, and their feet resting on the floor. The barbell grip width, similar to the static test, was 81 cm between the index fingers and was the

maximum allowed by the rules of the International Powerlifting Federation. One person (an experienced coach) controlled and secured the participants during the press. The participants were instructed to lower the barbell in a controlled manner until it touched the chest and then, without stopping, to push it upward until full elbow joint extension. The exercise protocol consisted of a total of 5 sessions that allowed the determination of the variables: S35 – 1 repetition with 35% 1RM load; S50 – with 50% 1RM load; S65 – 1 repetition with 65% 1RM load; S80 – 1 repetition with 80% 1RM load, and S100 – 1 repetition with 100% 1RM load. The rest period between sessions were 3 minutes, and the participants lay on the bench.

Statistical Analysis

Descriptive statistics, such as the arithmetic mean, standard deviation, and coefficient of variation, were used to evaluate the level of analyzed variables. The normality of the variables' distribution was checked using the Shapiro-Wilk test. Levene's test of homogeneity of variances was applied to verify the homogeneity of variables and determine the statistical tools. The results of the tests clearly indicated that the variables had a normal or near-normal distribution ($p > 0.05$).

The homogeneity of variances was examined before and after the training sessions using Levene's test and it showed no similarities, i.e., homogeneity for all variables. The values of the variables in both groups after the training sessions in the Levene test were also homogeneous.

Repeated measures ANOVA was applied to answer questions regarding testing hypotheses about the absence of differences between the values of the individual variables describing the intergroup and intragroup relationships.

The F statistic and level of significance were presented. A significance level of $p < 0.05$ was accepted. Tukey's post hoc tests for equal sample sizes (N) were performed in case of significant differences.

All calculations were performed using the Statistica 15.0 analytical program (Statsoft) and the Excel package (Microsoft Office 13).

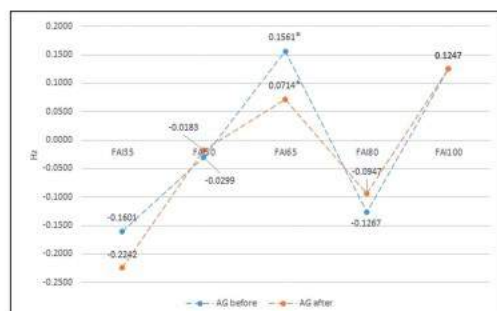


FIG. 1. The intra-group differences in FAI (Frontal Alpha Asymmetry) before biofeedback training, in relation to an external load for AG group. * statistically significant differences.

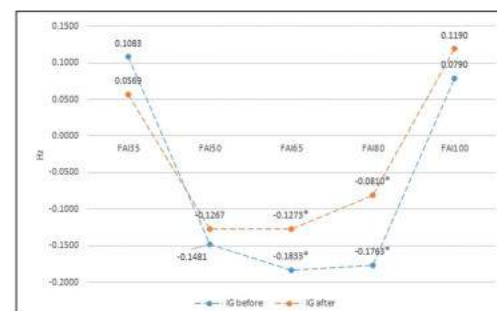


FIG. 2. The intra-group differences in FAI (Frontal Alpha Asymmetry) after biofeedback training, in relation to an external load for IG group. * statistically significant differences.

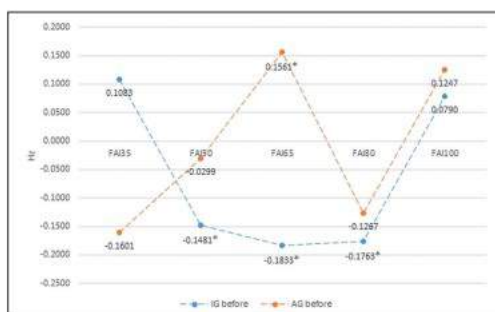


FIG. 3. The intergroup differences in FAI (Frontal Alpha Asymmetry) before biofeedback training, in relation to an external load.
* statistically significant differences.

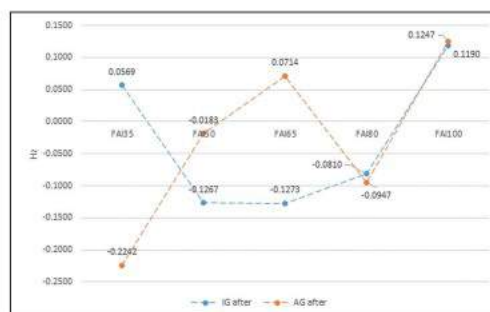


FIG. 4. The intergroup differences in FAI (Frontal Alpha Asymmetry) after biofeedback training, in relation to an external load.
* statistically significant differences.

TABLE 1. Characteristics of the study groups (n = 18)

Group	Advanced group		Intermediate group		p
	Variable	±	SD	±	SD
BM (kg)		82	2.512	81	1.821
BH (cm)		181	3	183	4
BMI (index)		24	1.721	25	1.688
PBF (%)		7	1.621	8	1.501
SMM (kg)		45	2.114	42	2.601

BM-Body mass; BH-Body height; BMI – Body Mass Index; PBF-Body fat percentage; SMM-Skeletal muscle mass.

TABLE 2. The result of the intergroup analysis of variance with repeated measures for the RH (right hemisphere) after biofeedback training, in terms of external load

Group	External load	Advanced group					Intermediate group				
		35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM	35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM
AG	35%1RM		0.510	0.550	0.989	0.120	0.937	0.989	0.989	0.989	0.855
AG	50%1RM	0.510		0.989	0.983	0.999	0.999	0.165	0.821	0.796	0.989
AG	65%1RM	0.550	1.000		0.989	0.998	0.999	0.186	0.850	0.827	0.989
AG	80%1RM	0.989	0.983	0.989		0.683	1.000	0.809	0.989	0.989	0.989
AG	100%1RM	0.120	0.999	0.998	0.683		0.866	0.022	0.327	0.301	0.943
IG	35%1RM	0.937	0.999	0.999	0.989	0.866		0.606	0.997	0.996	0.989
IG	50%1RM	0.989	0.165	0.186	0.809	0.022	0.606		0.981	0.986	0.456
IG	65%1RM	0.989	0.821	0.850	0.989	0.327	0.997	0.981		0.989	0.984
IG	80%1RM	0.989	0.796	0.827	0.989	0.301	0.996	0.986	0.989		0.979
IG	100%1RM	0.855	1.000	0.989	0.989	0.943	1.000	0.456	0.984	0.979	

IG – intermediate group, AG advanced group.

The impact of EEG biofeedback training

TABLE 3. The result of the intra and intergroup analysis of variance with repeated measures for the FAI (Frontal Alpha Asymmetry) before biofeedback training, in relation to an external load

Group	External load	Advanced group					Intermediate group				
		35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM	35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM
AG	35%1RM		0.915	0.028	0.989	0.071	0.111	0.989	0.989	0.989	0.226
AG	50%1RM	0.915		0.575	0.987	0.795	0.882	0.952	0.802	0.842	0.971
AG	65%1RM	0.028	0.575		0.075	0.989	0.989	0.040	0.013	0.016	0.998
AG	80%1RM	0.989	0.987	0.075		0.170	0.247	0.989	0.989	0.989	0.430
AG	100%1RM	0.071	0.795	0.989	0.170		1.000	0.099	0.036	0.044	0.989
IG	35%1RM	0.111	0.882	0.989	0.247	0.989		0.015	0.035	0.049	0.989
IG	50%1RM	0.989	0.952	0.040	0.989	0.099	0.015		0.989	0.989	0.290
IG	65%1RM	0.989	0.802	0.013	0.989	0.036	0.035	0.989		0.989	0.130
IG	80%1RM	0.989	0.842	0.016	0.989	0.044	0.039	0.989	0.989		0.155
IG	100%1RM	0.226	0.971	0.998	0.430	0.989	0.989	0.290	0.130	0.155	

IG – intermediate group, AG advanced group.

TABLE 4. The result of the intra and intergroup analysis of variance with repeated measures for the FAI (Frontal Alpha Asymmetry) after biofeedback training, in relation to an external load

Group	External load	Advanced group					Intermediate group				
		35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM	35%1RM	50%1RM	65%1RM	80%1RM	100%1RM
AG	35%1RM		0.272	0.029	0.819	0.003	0.034	0.965	0.966	0.751	0.003
AG	50%1RM	0.272		0.995	0.997	0.809	0.997	0.953	0.951	0.999	0.843
AG	65%1RM	0.029	0.995		0.731	0.999	0.989	0.450	0.446	0.801	0.989
AG	80%1RM	0.819	0.997	0.731		0.262	0.767	0.989	0.989	0.989	0.297
AG	100%1RM	0.003	0.809	0.999	0.262		0.998	0.106	0.104	0.326	0.989
IG	35%1RM	0.034	0.997	0.989	0.767	0.998		0.025	0.040	0.042	0.999
IG	50%1RM	0.965	0.953	0.450	0.989	0.106	0.025		0.989	0.989	0.124
IG	65%1RM	0.966	0.951	0.446	0.989	0.104	0.040	0.989		0.989	0.122
IG	80%1RM	0.751	0.999	0.801	0.989	0.326	0.042	0.989	0.989		0.366
IG	100%1RM	0.003	0.843	0.989	0.297	0.989	0.999	0.124	0.122	0.366	

IG – intermediate group, AG advanced group.

TABLE 5. Results of the bench press exercise before and after biofeedback training in AG and IG groups with statistical significant intra-group differences

	Advanced group			Intermediate group		
	Results before (kg)	Results after (kg)	p for AG	Results before (kg)	Results after (kg)	p for IG
35%1RM	82	86	0.456	75	84	0.175
50%1RM	118	123	0.501	108	120	0.089
65%1RM	153	159	0.389	140	156	0.048*
80%1RM	188	196	0.278	172	192	0.035*
100%1RM	235	245	0.154	215	240	0.028*

* statistically significant differences; IG – intermediate group, AG advanced group.

RESULTS

Repeated measures ANOVA showed no intra-group differences due to external loading for RH (right hemisphere) and LH (left hemisphere) variables obtained in EEG both before and after the biofeedback training.

The same analysis shows intra-group differences due to external loading for the FAI (Frontal Alpha Asymmetry) obtained in the EEG both before and after the biofeedback training. In the AG group, the analysis revealed significant differences between 65%1RM and 35%1RM, while in the IG group significant differences between 35%1RM and 50, 65, and 80%1RM (Tables 3 and 4, Figures 1 and 2).

At the same time, the repeated measures ANOVA showed significant intergroup differences due to external load for the RH after biofeedback training and for the FAI both before and after biofeedback training (Tables 2 to 4, Figures 3 and 4).

Table 5 shows the results of the bench press exercise before and after 8 weeks of EEG-biofeedback training for both groups.

DISCUSSION

Athletes use a variety of methods and tools to improve their performance and skills. One such innovation includes EEG biofeedback, a training method that statistically monitors brain activity to improve the efficacy of athletic training and, consequently, athletic performance [18, 19, 20, 21, 22]. The studies presented in this paper examine the effectiveness of bench press training using EEG biofeedback, as well as the impact of athletes' motivation, external load, and training intensity (15 biofeedback sessions – 8 weeks).

One of the most important elements affecting the effectiveness of a training program is the athlete's motivation. Highly motivated athletes are more committed to their training and perform better [23, 24]. It has been proven that motivated athletes are more likely to perform exercises correctly, which increases their [25, 26].

The research presented in this paper shows a statistically significant difference of the increasing external load in terms of the strength of positive motivation, especially in the case of loads of 50% 1RM, 60% 1RM, and 80% 1RM. Similar results were obtained by other researchers [27, 28]. This applies not only to athletes who practice strength sports. The dependencies of the external load in terms of motivation and its use to improve the effectiveness of training have been and are used in team sports games and athletic competitions [12, 13, 18]. The size of the external load is an important factor affecting the effectiveness of training. According to scientific studies, muscle mass, and strength increase with progressive external loads [29]. However, athletes' motivation can be undermined by overuse, and unwanted injuries can occur. As a result, it is essential to select the external load properly during training based on the athlete's fitness level [30, 31].

The level of training also has a parallel effect on the effectiveness of training. Well-trained athletes perform better and are less likely to be injured. Scientific studies have shown that the level of training affects the effectiveness of training. An athlete's ability to motivate

themselves during exercise increases with the level of training, which translates into improved exercise performance.

The research presented in the paper shows that even small external loads significantly change the athlete's motivation, especially in people with less training experience. The motivation of athletes, especially those with less training experience, decreases with increasing external load. The procedure is different for experienced athletes. At 80% 1RM and 100% 1RM, motivation increases most significantly (determined by EEG). Although the standard deviation was not excessive, the biofeedback training aimed to improve the FAI and thus increase motivation. However, in this study, the effect of this training was particularly visible in the group of IG players. Particularly significant changes in the improvement of bench press efficiency after biofeedback training were obtained for external loads of 65–100% 1RM. In the AG group, changes for the better were also noted, but they were not statistically significant. Similar results have been demonstrated by Standage and Ryan [32] and Xu [33]. This is because players with extensive experience are not as susceptible to biofeedback training as less experienced players. Probably, a much stronger training stimulus must be used in the training of advanced players [32, 33].

However, it is important to note that the amount of time an athlete spends exercising is not the only factor that determines their level of preparation. While consistent and adequate training is crucial for improving performance, it is also important to consider other factors such as nutrition, sleep, and recovery. People who are just starting strength training may have reduced exercise efficiency because they have not yet developed the necessary skills and muscle adaptations. On the other hand, advanced athletes who have been training for years may experience a plateau in their performance due to overtraining or inadequate recovery [34].

Moreover, the level of training is not only influenced by the amount of time an athlete spends training, but also by the quality and specificity of the training. Athletes who set specific and challenging goals for themselves, and who vary their training to target different aspects of performance, are more likely to improve their overall level of fitness and performance. Additionally, athletes who are under pressure to perform at their best may invest more time and energy into their training, but it is important to balance this with adequate rest and recovery to avoid burnout and injury. Overall, a combination of consistent, high-quality training, proper nutrition, recovery, and goal-setting is essential for optimizing athletic performance [34, 35].

There is one more aspect that is very important and affects the overall success of sports training and biofeedback, namely the motivational climate [36]. In addition to an individual's goal orientations, the particular environment or motivational climate created by the teacher, coach, peers, or parents can induce a state of task or ego involvement in sports and exercise situations. Gillet et al. [37] contended that the perceived motivational climate influences an individual's thoughts, feelings, and achievement behaviors. Consistent with task and ego goal orientations, two climates have been found to be

The impact of EEG biofeedback training

dominate in sports and educational environments: a performance (ego) climate and a mastery (task) climate. Research into perceptions of the motivational climate in sports and physical education (e.g. Lazarus [38]) has demonstrated that perceptions of a mastery climate are related to a task goal orientation, intrinsic motivation, a preference for challenging tasks, and beliefs that success is due to effort. Furthermore, a positive attitude, high satisfaction, low boredom and anxiety, high self-rated improvement, continued involvement, and self-determined reasons for participation have also been associated with perceptions of a mastery climate. The topic of the motivational climate was not the subject of this study, however, in the authors' opinion, such an important aspect had to be indicated.

Over the past 40 years, research on motivation and self-perception, or self-confidence, has produced some significant findings [39]. The first step is to use motivation to push through loads that are heavier than the athlete can handle. There may be several scenarios, but only one stands out. Low-ego athletes might not use biofeedback training in a sensible manner. This is especially true when athletes feel inadequate and fear failure. This is likely to result in maladaptive behaviors that affect training efficacy. The research findings unmistakably show that under such conditions, motivation wanes, commitment to tasks wanes, perseverance wanes, efficiency wanes, satisfaction and joy wanes, relationships with teammates and coaches wane, burnout is more likely, and athletes feel worse about themselves and their accomplishments [39]. This is true for athletes who lack motivation or whose motivation is used inappropriately. So, it's critical to gauge each situation's level of motivation at first [39].

EEG-biofeedback training can even be more beneficial. Positively motivated athletes with high self-esteem who have a good sense of their own competence are able to greatly boost the effectiveness of

training [40] self-ego's motivational function in athletes causes them to engage in persistent performance-related actions. But even then, when contextual information is absorbed [41], such as when age becomes a role in sports performance or when an injury occurs, ego-related objectives are more "fragile" and might lead to the maladaptive pursuit of achievement. Hence, other contextually significant criteria for the success of biofeedback training and, indirectly, the effectiveness of strength training are relevant in addition to the level of alpha waves that the research team researched and analyzed.

CONCLUSIONS

In conclusion, in this article, we explored the impact of differences in athletes' motivation on their performance during bench press exercises, with a focus on the magnitude of external load and level of training, and how EEG biofeedback training can help optimize performance. One of the major variables influencing the efficiency of strength training, including bench press exercise, is the level of training. The more successfully an athlete uses motivation when exercising, the better their training, which translates into better results and a lower chance of injury. Yet, consistency in training as well as the right amount of time and effort put into it is required to reach a high level of training. When modifying the intensity of the exercise, one should take into account the level of training and, consequently, the planned objectives of boosting the efficacy of overcoming external loads during bench press workouts.

Conflict of interest declaration

The authors declared no conflict of interest.

REFERENCES

1. Gracz J, Sankowski T. Sports psychology. In: Psychology of sports activity. Academy of Physical Education in Poznań. Poland. 2007; 4,9,16:23–233.
2. Yarrow K, Brown P, Krakauer J. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat Rev Neurosci*. 2009; 10(8):585–596.
3. Ericsson KA, Krampe RT, Romer C. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol*. 1993; 100:363–406.
4. Thompson M, Thompson L. The Neurofeedback Book 2nd Edition: An Introduction to Basic Concepts in Applied Psychophysiology. The Association for Applied Psychophysiology. 2015.
5. Demo JN. Getting Started with EEG Neurofeedback Second Edition. W.W. Norton & Company. 2019.
6. Baechle TR, Earle RW. Essentials of Strength Training and Conditioning. Champaign, IL: Human Kinetics. 2008.
7. van den Tillaar R., Ettema G. The "sticking period" in a maximum bench press. *J Sports Sci*. 2010; 28:529–535.
8. Welsch EA, Bird M, Mayhew JL. Electromyographic activity of the pectoralis major and anterior deltoid muscles during three upper-body lifts. *J Strength and Cond Res*. 2005; 19:449–452.
9. Anderson KG, Behm DG. Maintenance of EMG activity and loss of force output with instability. *J Strength and Cond Res*. 2004; 18:637–640.
10. van den Tillaar R., Saeterbakken A.H. Fatigue effects upon sticking region and electromyography in a six-repetition maximum bench press. *J Sports Sci*. 2013; 31:1823–1830.
11. Lebon F., Collet C., Guillot A. Benefits of motor imagery training on muscle strength. *J Strength Cond Res*. 2010; 24(6):1680–7.
12. Colquhoun RJ, Gai CM, Walters J, Brannon AR, Kilpatrick MW, D'Agostino DP, Campbell BI. Comparison of Powerlifting Performance in Trained Men Using Traditional and Flexible Daily Undulating Periodization. *J Strength Cond Res*. 2017; 31(2):283–291.
13. Saeterbakken AH, Mo DA, Scott S, Andersen V. The effects of bench press variations in competitive athletes on muscle activity and performance. *J Hum Kinet*. 2017; 57:61–71.
14. Chapman LJ, Chapman JP. The measurement of handedness. *Brain Cogn*. 1987; 6(2):175–83.
15. Sánchez A, Hernández NP, Penagos-Corzo JC, Ostróvskaya Y. Conveying mood and emotion in instant messaging by using a two-dimensional model for affective states. *Proceeding IHC*. 2006; 66–72.
16. Jaspers HH. The ten 20 electrodes system of the international federation. *Electroencephal Clin Neurophysiol*. 1958; 10:371–375.
17. Coan JA, Allen JJB. Frontal EEG asymmetry and the behavioral activation and inhibition systems. *Psychophysiol*. 2003; 40(1):106–114.
18. Baric R, Bucik V. Motivational differences

- in athletes trained by coaches of different motivational and leadership profiles. *Kinesio*. 2009; 41:181–194.
19. Bentzen M, Lemyre PN, Kenttä G. Changes in motivation and burnout indices in high-performance coaches over the course of a competitive season. *J. Appl. Sport Psychol.* 2016; 28:28–48.
 20. Bentzen M, Lemyre PN, Kenttä G. Development of exhaustion for high-performance coaches in association with workload and motivation: A person-centered approach. *Psychol Sport Exerc.* 2016; 22:10–19.
 21. Duda J L. Motivation in sport. In A.J. Elliot & C.S. Dweck (Eds.), *Handbook of competence and motivation*. New York, NY: Guilford Press. 2005; 318–335.
 22. Dweck CS, Leggett EL. A social-cognitive approach to motivation and personality. *Psychol Rev.* 1988; 95:265–273.
 23. Miller BW, Roberts GC, Ommundsen Y. Effect of motivational climate on sportpersonship among competitive youth male and female football players. *Scand J Med Sci Sports.* 2004; 14:193–202.
 24. Mouratidis A, Michou A. Perfectionism, self-determined motivation, and coping among adolescent athletes. *Psychol Sport Exerc.* 2011; 12:355–367.
 25. Papaioannou AG, Ziurbanos N, Krommidas C, Ampatzoglou G. The place of achievement goals in the context of sport: A comparison of Nicholls's and Elliot's models. In G.C. Roberts & D.C. Treasure (Eds.), *Advances in Motivation in sport and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics. 2012; 59–90.
 26. Pensgaard AM, Roberts GC. The relationship between motivational climate, perceived ability and sources of distress among elite athletes. *Sports Sci.* 2000; 18:191–200.
 27. Cronin JB, McNair PJ, Marshall RN. Force-velocity analysis of strength-training techniques and load: implications for training strategy and re-search. *J Strength Cond Res.* 2003; 17:148–55.57.
 28. Cronin JB, McNair PJ, Marshall RN. The role of maximal strength and load on initial power production. *Med Sci Sports Exerc.* 2000; 32:1763–9.
 29. Shaun J, McLaren TW, Macpherson AJ, Coutts CH, Spears IC, Weston M. (2018). *The Relationships Between Internal and External Measures of Training Load and Intensity in Team Sports: A Meta-Analysis*. *Sports Med.* 2018; 48:641–658.
 30. Roberts GC. Understanding the dynamics of motivation in physical activity: The influence of achievement goals on motivational processes. In Roberts (Ed.), *Advances in motivation in sport and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics. 2001.
 31. Roberts GC. Motivation in sport and exercise from an achievement goal theory perspective: After 30 years, where are we? In Roberts, Treasure (Eds.), *Advances in motivation in sport and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics. 2012; 3:5–58.
 32. Standage M, Ryan R. Self-determination theory and exercise motivation: Facilitating self-regulatory processes to support health and well-being. In Roberts, Treasure (Eds.), *Advances in motivation in sport and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics. 2012; 233–269.
 33. Xu Z. Effect of HRV feedback training on sportsmen's mental fatigue. *J Shandong Inst Physic Edu* 2009; 25(11):46–48.
 34. Solstad B. Toward a better understanding of the dynamics of sport coaching at the children's level. Unpublished doctoral dissertation, Norwegian School of Sport Science, Oslo, Norway. 2016.
 35. Wang CKJ, Biddle SJH. Young people's motivational profiles in physical activity: A cluster analysis. *J Sport Exerc Psychol.* 2001; 23:1–22.
 36. Morgan K, Sproule J. Motivation in Sport and Exercise. In book: *IB Course Companion: Sport, Exercise and Health Science*. Oxford Press. 2012; 231–241.
 37. Gillet N, Vallerand RJ, Lafreniere MAK, Bureau JS. The mediating role of positive and negative affect in the situational motivation-performance relationship. *Motiv Emot.* 2013; 37(3):465–479.
 38. Lazarus RS. How emotions influence performance in competitive sports. *Sport Psychol.* 2000; 14(3):229–252.
 39. Roberts GC, Nerstad CGL, Lemyre PN. *Motivation in Sport and Performance*. Printed in Oxford Research Encyclopedias, Psychology. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190236557.013.150>; Published online: 2018.
 40. Pensgaard AM, Roberts GC. Elite athletes' experiences of the motivational climate: The coach matters. *Scand J Med Sci Sports* 2002; 12:54–60.
 41. Dweck CS, Leggett EL. A social-cognitive approach to motivation and personality. *Psychol. Rev.* 1988; 95:265–273.



The Effects of EEG Biofeedback Training on Visual Reaction Time in Judo Athletes

by

Magdalena Prończuk¹, Grzegorz Trybek², Artur Terbalyan¹,
Jarosław Markowski³, Jan Pilch⁴, Michał Krzysztofik¹, Maciej Kostrzewa¹,
Aleksandra Mostowik¹, Adam Maszczyk^{1,*}

The aim of the study was to expand the current knowledge on the effects of EEG biofeedback training on the reaction time of judo athletes, as well as to develop an optimal EEG training protocol in terms of the number of sessions and their duration that would significantly improve the reaction time of athletes. The study included 24 male athletes from the national team of the Polish Judo Association. The selected group was randomly divided into two subgroups: experimental and control. The study was conducted in four cycles varying in terms of frequency and duration of neurofeedback (NFB) sessions, both in the control and experimental groups. In the experimental group, each training cycle consisted of 15 sessions, followed by a four-week break. The effects of NFB training on the visual reaction time of judo athletes were evaluated using computerized simple and complex reaction time tests along with selected trials of the Vienna Test System (VTS). Following NFB training according to the theta/beta1 protocol, while maintaining appropriate duration and frequency of individual training sessions, statistically significant improvements in reaction times to visual stimuli of athletes, both in simple and complex tasks, were observed in the experimental group. No such changes were found in the control group. The greatest improvement in reaction times was observed in complex tasks, indicating the high effectiveness of EEG biofeedback training in enhancing this ability.

Keywords: Vienna Test System; mental training; decoding device

Introduction

Since its inception in the 1960s, the concept of biofeedback has found diverse applications in fields such as psychology, medicine, parapsychology, business, and sports to enhance athletes' performance. One of the widely used biofeedback techniques is EEG biofeedback training (Electroencephalography), commonly known as neurofeedback (NFB) (Razran, 1961; Rostami et al., 2012).

NFB represents a more sophisticated form of biofeedback, employing a technological self-regulating stimulation method to restore brain functioning patterns and improve cognitive, emotional, and behavioral performance (Gong et

al., 2021; Salimnejad et al., 2019). The analysis of EEG signals, captured using electrodes placed on the subject's scalp, is graphically presented and displayed on a monitor screen, providing feedback on the current changes occurring in their brain. The core principle of EEG biofeedback lies in the assumption that the brain's bioelectrical activity reflects the subject's emotional states and can be controlled and modified through training (Artymiak et al., 2017; Salimnejad et al., 2019).

NFB utilizes measured changes in brain activation to assist athletes in regulating the activity or power of designated EEG frequency bands, offering them real-time activation information (Brito et al., 2022; Paret et al., 2019).

¹ Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland.

² Department of Oral Surgery, Pomeranian Medical University in Szczecin, Szczecin, Poland.

³ Department of Laryngology, Faculty of Medical Sciences, Medical University of Silesia in Katowice, Katowice, Poland.

⁴ Department of Physiological and Medical Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland.

* Correspondence: a.maszczyk@awf.katowice.pl



EEG has been used in various studies to assess neuronal activity dynamics in the cerebral cortex, with different brain waves recorded, including theta (4–8 Hz), alpha (10–12 Hz), beta (22–15 Hz), and sensorimotor rhythm (12–15 Hz). These waves have been proven useful in understanding the enhancement of cognitive-motor processes (Sherlin et al., 2015). Research conducted among athletes in various sports disciplines such as golf, tennis, archery, soccer, and judo has demonstrated that the development of skills in producing specific cortical activity patterns through NFB training positively affects their efficiency and sports performance (Chung et al., 2021; Landers et al., 1994; Maszczyk et al., 2018, 2020; Saha et al., 2014).

In sports like judo, where visual attention and its contribution to decision-making and motor response planning are crucial for success, a high level of concentration and the ability to quickly react to visual stimuli are particularly important. Thus, it is recommended to focus on improving these skills in the training process of judokas, enhancing their visual processing mechanisms and response time to stimuli (Mirifar et al., 2018).

Reaction time, i.e., the time elapsed from perceiving a stimulus to reacting to it, serves as an indicator for assessing the internal cognitive-motor resources associated with an athlete's performance. Parsaee et al.'s (2018) and Pourbebahani et al.'s (2023) studies, which assessed the impact of NFB training on visual and auditory reaction time, revealed that NFB effectively improved brain functions in terms of visual and auditory reaction time.

The objective of the present study was twofold: first, to expand the current knowledge on the effectiveness of EEG biofeedback training to improve the reaction time of judo athletes, and second, to develop an optimal EEG training protocol in terms of the number of sessions and their duration to significantly enhance the reaction time of the studied judokas.

Methods

Participants

The study involved 24 male athletes from the national team of the Polish Judo Association in the southern region of the country, aged between 22 and 25 years. Subsequently, the group was randomly divided into two subgroups: experimental ($n = 12$) and control ($n = 12$). All

participants received information about the study's objectives and procedures, they were also informed that they could withdraw from the study at any stage. The research was approved by the Bioethics Committee for Scientific Research at the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland and was conducted as part of the grants (N RSA4 04054).

Research Procedures

The study was conducted in four cycles, with variations in the frequency and duration of NFB sessions for both the control and experimental groups. In the experimental group, each cycle consisted of 15 training sessions, followed by a four-week break, following the modification of Thompson's training (Thompson and Thompson, 2005). The duration of training sessions was modified from Dupee's training (Dupee et al., 2016), with 10 min and 4 min in successive rounds of the study.

The primary training protocol employed in the experimental group focused on theta/beta1 training, with the objective of improving concentration and attaining a state often referred to as "narrow attention" among athletes. The control group underwent an identical training regimen to the experimental group, with the same cycle, duration, and frequency of NFB training sessions. However, in the control group, instead of implementing the theta/beta1 protocol, an EEG simulation was displayed that was independent of the brain wave patterns generated by athletes.

Before initiating the first training cycle and after completing each subsequent one, simple and complex reaction time tests were conducted in both research groups.

EEG Biofeedback Training

EEG biofeedback training, also known as NFB training, was conducted using Biograph Infiniti 6.0 software and a 5-channel decoding device (ProComp5). The EEG sensor used in this setup allowed for high-quality signal reception with minimal noise content. The device's quality was confirmed through ISO certification and CE medical certification. Before recording the EEG signal, the impedance levels of the electrodes and interelectrode impedance were checked using a built-in impedance sensor.

To initiate the diagnosis and NFB training, the requirement was to achieve an impedance level

below 5 k Ω and a difference of no more than 1 k Ω between electrodes. Each training session in the individual cycle began with a 3-min single-channel EEG diagnosis using three reference connections. During this phase, the participant was instructed to perform specific tasks, including sitting with eyes open for one minute, sitting with eyes closed for one minute, and sitting with eyes open while counting backwards by 7 from 100.

For the diagnosis, the reference electrode was placed on the left ear lobe, grounded on the right, and the active electrode at point Cz, following the international 10–20 system. During NFB training, the active electrode was placed at point C3, which allowed the main training objective to be achieved. This objective was to shape the ability of athletes to maintain an optimal balance between fast (beta) and slow (theta) waves, which are responsible for achieving a state of concentration and focus.

Throughout each NFB session, the percentage of time spent above the threshold was monitored. This measurement served as the primary indicator of the participant's progress and allowed for the optimization of the training difficulty level for each athlete.

During NFB training sessions, real-time feedback was provided to athletes based on their brainwave activity. The main focus was on shaping their ability to enhance the balance between beta and theta waves to achieve an optimal state of concentration and focus. The employed software allowed athletes to visualize their brainwave patterns on a computer screen during training.

NFB training consisted of multiple cycles, and each cycle comprised several sessions. In the experimental group, each cycle included 15 training sessions, followed by a four-week break, as mentioned earlier. The duration of training sessions varied across successive rounds of the study, with sessions lasting 10 min and 4 min alternately, as per the modification of Dupree's training method. Throughout NFB training, researchers closely monitored the percentage of time that athletes spent above the predetermined threshold for beta and theta waves. This measure served as the primary indicator of their progress and allowed researchers to adjust the difficulty level of training for each individual, ensuring that training was tailored to their specific needs and responses.

The goal of NFB training in the experimental group was to increase concentration and achieve what is known as "narrow attention" in athletes. This enhanced the ability to focus and maintain the optimal balance of brainwave activity what could potentially lead to improved athletic performance.

In the control group, NFB training sessions followed the same schedule, duration, and frequency as the experimental group. However, instead of using the theta/beta1 training protocol, the control group underwent an EEG simulation that was independent of their actual brainwave patterns. This setup allowed researchers to assess the specific effects of the theta/beta1 protocol used in the experimental group compared to a non-specific EEG simulation.

Before commencing the first cycle of sessions and after completing each subsequent one, both research groups underwent simple and complex reaction time tests. These tests were conducted to assess any changes in reaction times and cognitive performance resulting from NFB training in both the experimental and control groups.

Overall, EEG biofeedback training with the theta/beta1 protocol aimed to explore the potential benefits of this specific training method for athletes' concentration and focus (Christie and Werthner, 2015; Chung et al., 2021; Landers et al., 1994; Maszczyk et al., 2018, 2020; Saha et al., 2014). The results of the study could have implications for optimizing athletic training programs and enhancing athletes' mental and cognitive capabilities.

Visual Reaction Time Tests

The study aimed to investigate the impact of NFB training on the visual reaction time of judo athletes. To assess this, computerized simple and complex reaction time tests were conducted, along with selected trials from the Vienna Test System (VTS). The tests were carried out in the morning, ensuring optimal conditions for concentration during the tasks. Each trial was repeated twice at 5-min intervals, and the better of the two measurements was recorded for subsequent analysis.

The computerized simple reaction speed test consisted of athletes pressing a specified key on the keyboard with either their right or left hand as quickly as possible when a bright square appeared

on the monitor screen. The complex reaction time task required pressing a key on the keyboard promptly in response to the location of the square that appeared on the screen. Different keys were used for squares in the right or left position and for squares in the central position. In both tests, the signal appeared 10 times, with intervals ranging from 2 to 6 s. The time from the appearance of the stimulus to the key press was measured with high accuracy of 0.001.

For the measurement of simple reaction time to visual stimuli, a reaction speed measuring device (RT) component of the VTS was used. The participant's task was to move their hand as quickly as possible from the "rest key" to the "reaction key" when a yellow LED was lit. The mean reaction time in seconds was then calculated based on the data obtained from the tests.

Complex reaction time was assessed using a decision-making device (DG) integrated into the VTS. In this trial, athletes were tasked with swiftly pressing the corresponding key based on the LED's color that illuminated when the stimulus was presented. The software recorded both correct and incorrect responses, the average reaction time, and the standard deviation of the mean reaction time. The signal was presented 15 times during this testing phase. By analyzing the results from these computerized tests, researchers sought to determine whether NFB training had any significant effect on the visual reaction time of judo athletes.

Research Cycles

The first research cycle comprised 15 training sessions, conducted every other day, with each session lasting 10 min. In the second research cycle, the training frequency increased, while the duration of each session decreased. Training sessions were held daily, and each session lasted 4 min. In the third research cycle, training sessions took place daily, yet their duration was increased to 10 min. Finally, the fourth research cycle consisted of 4-min training sessions held every other day. All four research cycles were interspersed with a four-week break.

During each training session in all cycles, the percentage of time spent above the threshold was closely monitored. This threshold was adjusted upward for reinforced waves and downward for inhibited waves. Such an adjustment ensured that

the level of difficulty of NFB training was optimal and tailored to individual progress.

Overall, the study adopted a progressive approach, modifying the frequency and duration of training sessions across different cycles. By varying these factors, the researchers aimed to assess the effectiveness of NFB training and determine the most suitable training protocol for enhancing athletes' cognitive functions, specifically visual reaction time, and potentially improve their overall performance in judo competitions.

Statistical Analysis

Descriptive statistics, including arithmetic means, standard deviations, and coefficients of variation, were calculated. The normality of variable distribution was checked using the Shapiro-Wilk test. Additionally, the Levene's test was applied to assess the homogeneity of variance among the variables and determine appropriate statistical tools for further analysis. The test results indicated that all variables had a normal or close-to-normal distribution ($p > 0.05$).

However, it was observed that the groups lacked homogeneity of variance for all variables before training, as determined by the Levene's test. Nevertheless, after training, the values of variables in both groups became homogeneous which was verified using the Levene's test.

To test hypotheses related to differences between the values of individual variables describing intergroup and intragroup relationships, ANOVA was used. The F-statistics and significance levels ($p < 0.05$) were presented. When significant differences were found, Tukey's post-hoc tests were performed for equal sample sizes (N).

The researchers calculated the mean reaction times for both simple and complex reaction time tasks in each group. Changes in reaction time, accuracy, and variability among the athletes were examined. The data analysis aimed to determine if there were any significant differences between the two groups after NFB training.

All the statistical calculations were performed using the Statistica 12.0 (Statsoft) and the Excel package (Microsoft Office 13).

Results

After conducting individual training cycles using the EEG biofeedback method, statistically significant differences were observed between the control and the experimental group in the results of simple and complex reaction times in selected trials of the VTS (Figures 1 and 2).

ANOVA ($p < 0.05$) revealed differences in the values of the investigated variables of simple and complex reaction speeds in selected trials of the VTS before and after the application of individual training cycles using the EEG biofeedback method in the experimental group (Figures 3 and 4).

Figure 5 presents a graphical visualization of the test-related improvements in simple and complex reaction times before and after the conducted EEG biofeedback training cycles in selected trials of the VTS.

The post-hoc Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test indicated significant differences in the obtained simple reaction times in

selected trials of the VTS between the third and fourth cycles compared to the first cycle of EEG biofeedback training. However, no significant difference was observed between the fourth and second training cycles. It can be clearly stated that significant improvement in simple reaction time occurred after the third and fourth cycles. Significant differences were noted between the examined variables of complex reaction speed in selected trials of the VTS in relation to the experimental group before the individual NFB training cycles. The analysis of results indicates significant linear differences between the recorded complex reaction times in selected trials of the VTS between the third and fourth cycles compared to the first cycle of NFB training. However, no significant difference was found between the third and second cycles or between the first and second training cycles. It can be concluded that significant improvements in complex reaction time occurred after the third training cycle, and especially after the fourth cycle of NFB training (Figures 6 and 7).

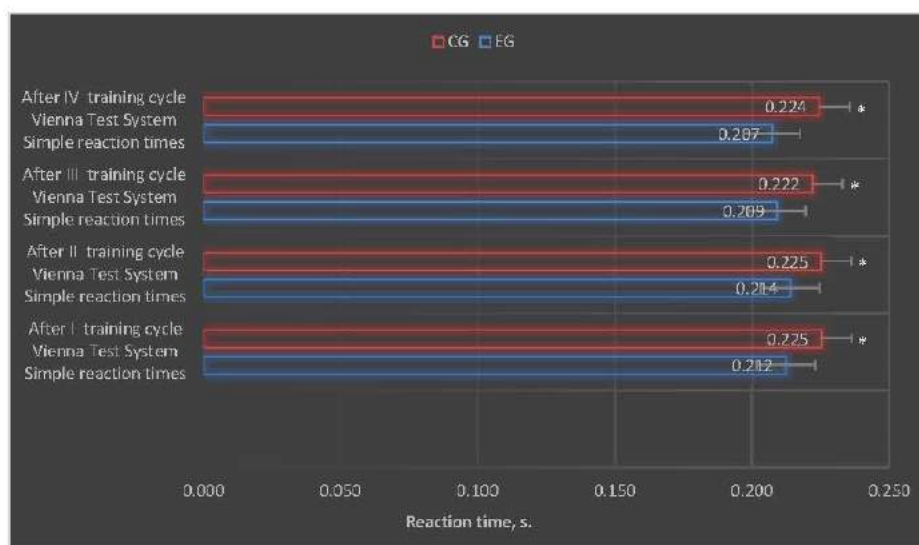


Figure 1. Graphic presentation of simple reaction time results obtained in the experimental and control groups after each EEG biofeedback training cycle. CG: control group; EG: experimental group; *: $p < 0.05$

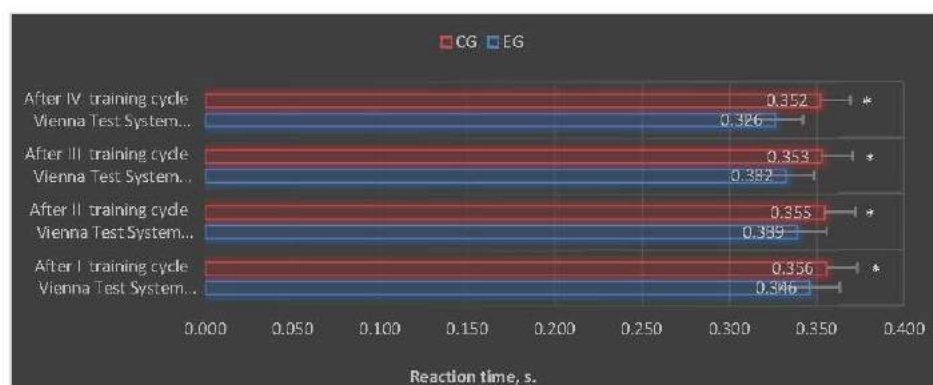


Figure 2. Graphic presentation of complex reaction time results obtained in the experimental and control groups after each EEG biofeedback training cycle.

CG: control group; EG: experimental group; *: $p < 0.05$

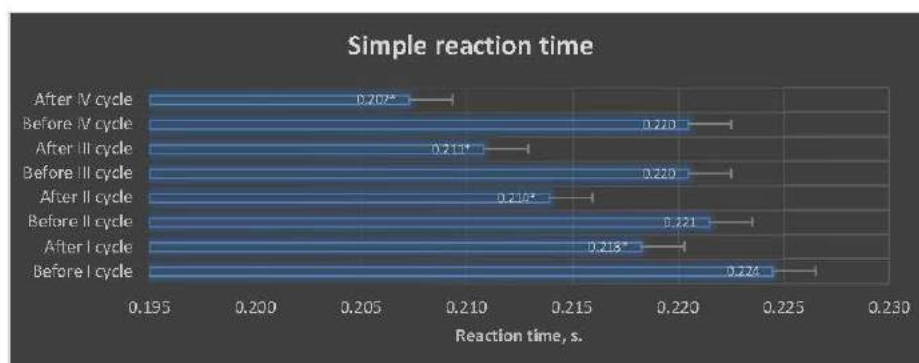


Figure 3. Graphic presentation of differences in simple reaction time results obtained before and after EEG biofeedback training cycles in the experimental group. *: $p < 0.05$

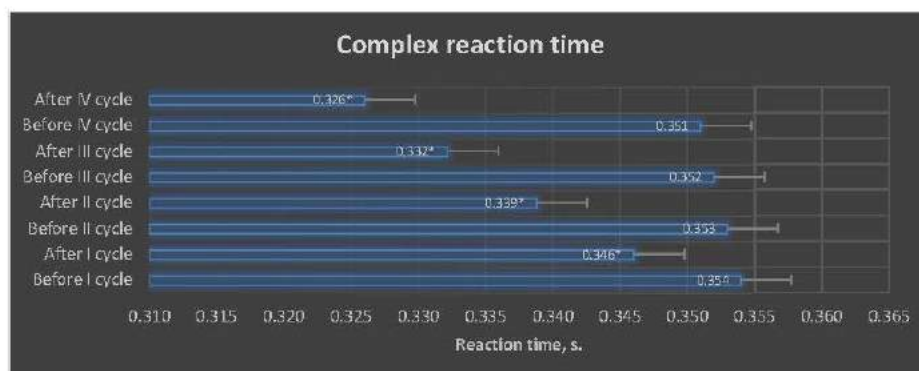


Figure 4. Graphic presentation of differences in complex reaction time results obtained before and after EEG biofeedback training cycles in the experimental group. *: $p < 0.05$

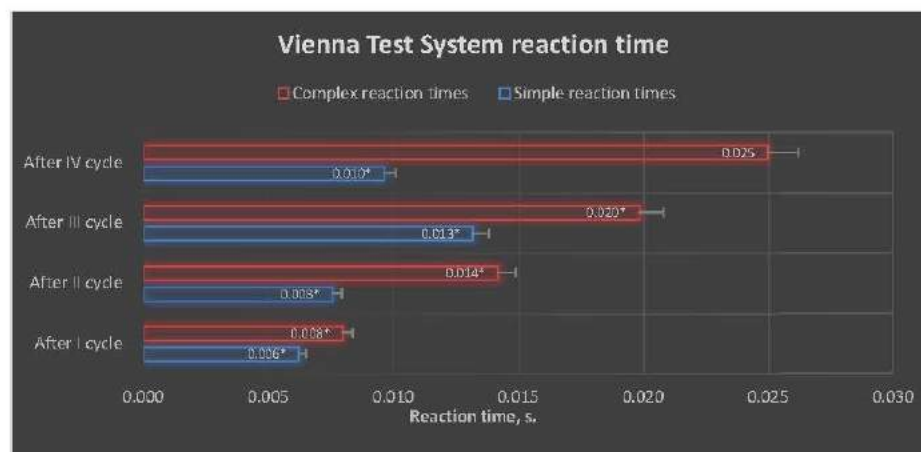


Figure 5. Visualization of improvements in simple and complex reaction times after each cycle of EEG biofeedback training in selected Vienna Test System tasks in the experimental group. *: $p < 0.05$

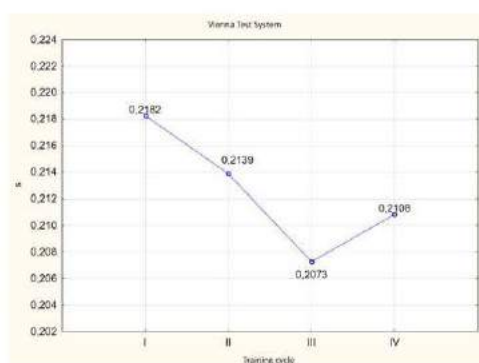


Figure 6. Graphic visualization of differences in simple reaction time test results in selected Vienna Test System tasks between individual cycles of EEG biofeedback training in the experimental group.

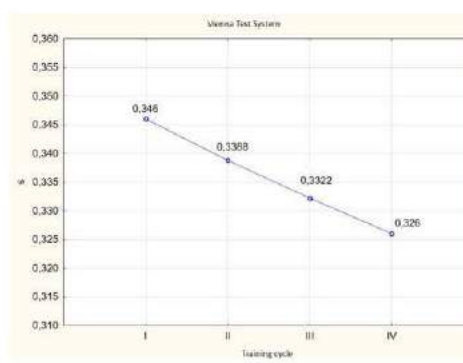


Figure 7. Graphic visualization of differences in complex reaction time test results in selected Vienna Test System tasks between individual cycles of EEG biofeedback training in the experimental group.

Discussion

The introduction of modern arousal management techniques in mental training of athletes, such as EEG biofeedback training, and the development of optimal training protocols to enhance athletes' potential, can be useful tools in the field of sports psychology. Prior research suggests that athletes can acquire the ability to produce and sustain particular neural brain activity patterns linked to improved performance through EEG biofeedback training (Blumenstein and Orbach, 2012, 2012a; Lansbergen et al., 2010; Maszczyk et al., 2018). Therefore, the present study aimed to investigate the effects of EEG biofeedback training on the reaction time of judo athletes and to develop an optimal training protocol for improving reaction times. The innovation of the applied NFB training protocol was its implementation in four cycles, with varying duration and frequencies of individual training sessions, ensuring alternative measurement conditions to identify the most favorable configuration. The study showed that athletes in the experimental group achieved a statistically significant improvement in simple and complex reaction times after each training cycle as a result of implementing the theta/beta1 protocol. No such changes were observed in the control group. In another study among judo athletes, the most significant decrease in simple reaction times was attained after the second training cycle, during which training sessions were held every other day for 4 min (Maszczyk et al., 2020). Moreover, in a study involving members of the Canadian National Speed Skating Team, significant improvements in reaction time were observed between the fourth and fifth (last) weeks of training, involving two training sessions per week (Harvey et al., 2011). This confirms previous findings indicating that athletes can learn to generate specific brain neural activity that leads to increased performance (Engelbregt et al., 2016), as well as complements existing analyses on the positive impact of using different forms of biofeedback training on visual perception and the reduction of athletes' reaction times (Christie and Werthner, 2015). The obtained results are also consistent with previous reports suggesting that by strengthening beta1 activity and inhibiting theta waves over the motor cortex, processes related to visual attention are improved. Thus, it may be

concluded that NFB training can significantly improve reaction time in athletes.

The results of the present study clearly demonstrate the positive effects of NFB training on the reaction times of judo athletes. The experimental group, which underwent NFB training according to the theta/beta1 protocol, showed significant improvements in reaction times to visual stimuli, both in simple and complex tasks. On the other hand, no such changes were observed in the control group, which did not receive NFB training. These findings support previous research that has shown the potential benefits of EEG biofeedback in enhancing cognitive-motor processes and improving sports performance (Chung et al., 2021; Landers et al., 1994; Maszczyk et al., 2018, 2020; Saha et al., 2014).

Our findings indicate that NFB training can be particularly effective in improving complex reaction times, which are crucial in sports like judo where quick decision-making and response planning are essential for success. This improvement in complex tasks highlights the high effectiveness of EEG biofeedback training in enhancing cognitive abilities related to concentration and focus (Christie and Werthner, 2015; Engelbregt et al., 2016).

The study's contribution to the existing literature is valuable as it provides insights into the practical application of EEG biofeedback training in sports performance enhancement. The development of an optimal training protocol based on EEG measurements offers a structured and systematic approach to improving reaction times in athletes. Such information can be beneficial for coaches, trainers, and sports psychologists working with judo athletes or other sports disciplines where quick reactions and focus are crucial for success.

However, there are certain limitations of the study to be considered. Firstly, the sample size was relatively small, consisting of 24 male judo athletes from a specific region. A larger and more diverse sample would increase the generalizability of the findings. Additionally, the study focused solely on male athletes. Future studies could include female participants to understand potential gender differences in the response to NFB training.

Furthermore, the study did not explore the long-term effects of NFB training beyond the four training cycles. It would be interesting to

investigate whether the improvements in reaction times are sustained over time or whether additional training sessions are needed to maintain the obtained benefits.

This study provides valuable insights into the effectiveness of EEG biofeedback training in improving the reaction times of judo athletes. The results suggest that NFB training can be a useful tool in sports performance enhancement, particularly for tasks requiring quick reactions and focused attention. Coaches can use this knowledge to design targeted training protocols for athletes, aiming to improve their cognitive-motor processes and achieve better sports results. However, further research with larger and more diverse samples is needed to validate and extend these findings (Chung et al., 2021; Saha et al., 2014).

Future research in the field of EEG biofeedback training and sports performance could explore several areas of interest. Firstly, as mentioned earlier, investigating the long-term effects of NFB training is essential. A longitudinal study tracking athletes' reaction times over an extended period, even beyond the training cycles used in this study, would provide valuable insights into the sustainability of the obtained improvements. Understanding whether the benefits persist over time or if periodic booster sessions are required for maintenance would help optimize training protocols.

Secondly, it would be beneficial to examine the transferability of the improved reaction times to actual sports performance. While NFB training has been proven effective in enhancing cognitive-motor processes, it is essential to determine whether these improvements translate into real-world situations during judo competitions or other sports events. Observing athletes' reactions in live competitions, as well as their success rates in executing specific moves or strategies, would provide a more comprehensive assessment of the training's practical benefits (Landers et al., 1994; Maszczyk et al., 2018, 2020).

Additionally, expanding the scope of the study to include other sports disciplines would be valuable. Different sports require distinct cognitive and motor skills, and NFB training may have varying effects on athletes from different sports backgrounds. Investigating the impact of EEG biofeedback on athletes in various sports, such as team sports like soccer or individual sports like

tennis, could lead to a better understanding of its potential applications across different athletic domains.

Furthermore, exploring the individual differences in response to NFB training would be worthwhile. Not all athletes may show the same degree of improvement in reaction times after training. Factors such as baseline cognitive abilities, training adherence, and motivation could influence the outcomes. Identifying individual factors that contribute to training success could help tailor NFB protocols to suit each athlete's needs, making NFB training more personalized and effective.

In terms of methodology, future studies could consider incorporating control groups that receive other forms of cognitive training or traditional physical training without NFB. Comparing the effects of NFB training to other interventions would help establish its unique contributions and advantages. Additionally, using a double-blind experimental design, where both participants and researchers conducting the tests are unaware of group assignment, would minimize potential biases and enhance the study's internal validity.

Finally, advancing the technology used in EEG biofeedback training could improve its efficacy and practicality. Integrating real-time biofeedback into wearable devices or mobile applications would enable athletes to engage in NFB training outside the laboratory setting, making it more accessible and convenient for regular training sessions.

In conclusion, the study on the effectiveness of EEG biofeedback training in improving the reaction times of judo athletes has provided valuable insights into the potential benefits of this technique in sports performance enhancement. The results suggest that NFB training can be a useful tool in sports psychology for enhancing cognitive-motor processes, particularly for tasks requiring quick reactions and focused attention. The development of an optimal training protocol based on EEG measurements offers a structured and systematic approach to improve reaction times in athletes.

While the findings are promising, further research with larger and more diverse samples is needed to validate and extend these findings. Investigating the long-term effects of NFB training,

the transferability of improvements to real-world sports performance, and potential gender differences in the response to training would contribute to a more comprehensive understanding of the technique's benefits. Moreover, exploring individual factors that influence training effectiveness and incorporating control groups with alternative interventions would strengthen the study's conclusions (Maszczyk et al., 2018, 2020).

Overall, the study underscores the potential of EEG biofeedback training as a valuable addition to the toolkit of sports psychology, providing a means to enhance athletes' cognitive abilities and improve their sports performance. As sports continue to become more competitive, the pursuit of innovative and effective training methods like NFB can give athletes a competitive edge and help them reach their full potential. Coaches and sports psychologists can utilize this knowledge to design tailored training programs

that optimize cognitive-motor processes and foster improved athletic performance in various sports disciplines, not just judo. By continuously exploring and refining the application of EEG biofeedback training, sports science can continue to evolve and contribute to the success of athletes at all levels.

The results of the study provide valuable insights into the potential benefits of NFB training on cognitive functions, such as visual reaction time, in athletes. It could also contribute to the understanding of how NFB training may be incorporated into athletic training programs to optimize athletes' mental and cognitive abilities, leading to better sports performance. Future studies could build on this research and address any identified limitations to further explore the potential applications of NFB training in sports performance and cognitive enhancement for athletes.

Author Contributions: Conceptualization: M.P., A.T., G.T., and A.M. (Adam Maszczyk); methodology: M.P., A.T., G.T., M.K. (Michał Krzysztófik), M.K. (Maciej Kostrzewa) and A.M. (Adam Maszczyk); software: A.T. and A.M. (Adam Maszczyk); validation: M.P., J.M., J.P., G.T. and A.M. (Adam Maszczyk); formal analysis: A.M. (Aleksandra Mostowik), A.M. (Adam Maszczyk) and M.P.; investigation: M.P., G.T. and A.T.; resources: M.P., J.M., J.P., M.K. (Maciej Kostrzewa) and A.M. (Adam Maszczyk); data curation: A.M. (Adam Maszczyk), A.M. (Aleksandra Mostowik) and M.P.; writing—original draft preparation: M.P., G.T., A.M. (Aleksandra Mostowik) and A.M. (Adam Maszczyk); writing—review & editing: M.P., G.T., A.M. (Aleksandra Mostowik) and A.M. (Adam Maszczyk); visualization: A.M. (Adam Maszczyk) and A.T.; supervision: M.P., J.M., G.T., M.K. (Michał Krzysztófik) and A.M. (Adam Maszczyk); project administration: A.M. (Adam Maszczyk); funding acquisition: N/A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

ORCID iD:

Adam Maszczyk: 0000-0001-9139-9747

Michał Krzysztófik: 0000-0003-2797-8431

Jarosław Markowski: 0000-0003-3416-7354

Jan Pilch: 0000-0002-2682-4708

Aleksandra Mostowik: 0000-0001-6536-4612

Funding Information: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted following the principles of the Declaration of Helsinki, and approved by the Ethical Committee of the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice (approval code: 07/2019; approval date: 03 July 2019).

Informed Consent: Informed consent was obtained from all participants included in the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Received: 17 July 2023

Accepted: 10 October 2023

Published: 27 October 2023

References

- Artymiak, M., Niewiadomy, M., Pielecka-Sikorska, M., & Weiner, A. (2017). Application of the EEG Biofeedback method in attention deficits therapy in young sportspeople - A pilot study. *Balt J Health Phys Activ*, 9(3), 106-114. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.09.3.10>
- Blumenstein B., & Orbach I. (2012a). Biofeedback training at sea. In W. A. Edmonds & G. Tenenbaum (Eds.), *Case studies in applied psychophysiology: Neurofeedback and biofeedback treatments for advances in human performance* (pp. 134-144). Wiley-Blackwell.
- Blumenstein B., & Orbach I. (2012b). The road to Olympic medal. In W. A. Edmonds & G. Tenenbaum (Eds.), *Case studies in applied psychophysiology: Neurofeedback and biofeedback treatments for advances in human performance* (pp. 120-123). Wiley-Blackwell.
- Christie, S., & Werthner, P. (2015). Prestart Psychophysiological Profile of a 200-m Canoe Athlete: A Comparison of Best and Worst Reaction Times. *Biofeedback*, 43(2), 73-83. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-43.2.05>
- Chung, C., Kim, B., Jang, C.Y., & Choi, E. (2001). *Effects of Concentration Training with Brainwave Biofeedback on Tennis Performance*.
- Brito, M. A. D., Fernandes, J. R., Esteves, N. S., Müller, V. T., Alexandria, D. B., Pérez, D. I. V., Slimani, M., Brito, C. J., Bragazzi, N. L., & Miarka, B. (2022). The Effect of Neurofeedback on the Reaction Time and Cognitive Performance of Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 20(16), 868450. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.868450>
- Dupee, M., Forneris, T., & Werthner, P. (2016). Perceived Outcomes of a Biofeedback and Neurofeedback Training Intervention for Optimal Performance: Learning to Enhance Self-Awareness and Self-Regulation With Olympic Athletes. *The Sport Psychologist*, 30(4), 339-349. <https://doi.org/10.1123/tsp.2016-0028>
- Engelbregt, H., Keeser, D., van Eijk, L., Suiker, E., Eichhorn, D., Karch, S., Deijen, J., & Pogarell, O. (2016). Short and long-term effects of sham-controlled prefrontal EEG-neurofeedback training in healthy subjects. *Clinical Neurophysiology*, 127(4), 1931-1937. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.01.004>
- Gong, A., Gu, F., Nan, W., Qu, Y., Jiang, C., & Fu, Y. (2021). A Review of Neurofeedback Training for Improving Sport Performance From the Perspective of User Experience. *Frontiers in Neuroscience*, 28(15), 638369. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.638369>
- Harvey, R. H., Beauchamp, M. K., Saab, M., & Beauchamp, P. (2011). Biofeedback Reaction-Time Training: Toward Olympic Gold. *Biofeedback*, 39(1), 7-14. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-39.1.03>
- Landers, D. M., Han, M., Salazar, W., Petruzzello, S. J., Kubitz, K. A., & Gannon, T. L. (1994). Effects of learning on electroencephalographic and electrocardiographic patterns in novice archers. *International Journal of Sport Psychology*, 25(3), 313-330.
- Lansbergen, M. M., van Dongen-Boomsma, M., Buitelaar, J. K., & Slaats-Willemse, D. (2010). ADHD and EEG-neurofeedback: a double-blind randomized placebo-controlled feasibility study. *Journal of Neural Transmission*, 118(2), 275-284. <https://doi.org/10.1007/s00702-010-0524-2>
- Maszczyk, A., Gołaś, A., Pietraszewski, P., Kowalczyk, M., Cieszczyk, P., Kochanowicz, A., Smółka, W., & Zajac, A. (2018). Neurofeedback for the enhancement of dynamic balance of judokas. *Biology of Sport*, 35(1), 99-102. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2018.71488>
- Maszczyk, A., Dobrakowski, P., Nitychoruk, M., Żak, M., Kowalczyk, M., & Toborek, M. (2020). The Effect of Neurofeedback Training on the Visual Processing Efficiency in Judo Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 71(1), 219-227. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0097>

- Mirifar, A., Keil, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2018). No Effects of Neurofeedback of Beta Band Components on Reaction Time Performance. *Journal of Cognitive Enhancement*, 3(3), 251–260. <https://doi.org/10.1007/s41465-018-0093-0>
- Paret, C., Goldway, N., Zich, C., Keynan, J. N., Hendler, T., Linden, D., & Cohen Kadosh, K. (2019). Current progress in real-time functional magnetic resonance-based neurofeedback: Methodological challenges and achievements. *NeuroImage*, 202, 116107. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116107>
- Parsace, S., Alboghbish, S., Abdolahi, H., Alirajabi, R., & Anbari, A. (2018). Effect of a period of Selected SMR/Theta Neurofeedback Training on Visual and Auditory Reaction Time in Veterans and Disabled Athletes. *Iranian Journal of War and Public Health*, 10(1), 15–20. <https://doi.org/10.29252/ijwph.10.1.15>
- Pourbehbahani, Z., Saemi, E., Cheng, M. Y., & Dehghan, M. R. (2023). Both Sensorimotor Rhythm Neurofeedback and Self-Controlled Practice Enhance Motor Learning and Performance in Novice Golfers. *Behavioral Sciences*, 13(1), 65. <https://doi.org/10.3390/bs13010065>
- Razran, G. (1961). The observable and the inferable conscious in current Soviet psychophysiology: Interoceptive conditioning, semantic conditioning, and the orienting reflex. *Psychological Review*, 68(2), 81–147. <https://doi.org/10.1037/h0039848>
- Rostami, R., Sadeghi, H., Karami, K. A., Abadi, M. N., & Salamati, P. (2012). The Effects of Neurofeedback on the Improvement of Rifle Shooters' Performance. *Journal of Neurotherapy*, 16(4), 264–269. <https://doi.org/10.1080/10874208.2012.730388>
- Saha, S., Ahmed, M., Huda, F., Zahir, N. E. B. M., Nur Fasya, L., & Saha, S. (2014). Impact of differential biofeedback interventions on autonomic habituation and fatigability in soccer players. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 6(1), 969–976.
- Salimnejad, Z., Zandi, H., & Arsham, S. (2019). Effect of Bio-Neural Feedback Exercises on the Performance of Female Rugby Players. *International Journal of Motor Control and Learning*, 1(2), 10–18. <https://doi.org/10.29252/ijmcl.1.2.10>
- Sherlin, L. H., Ford, N. C. L., Baker, A. R., & Troesch, J. (2015). Observational Report of the Effects of Performance Brain Training in Collegiate Golfers. *Biofeedback*, 43(2), 64–72. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-43.2.06>
- Thompson, L., & Thompson, M. (2005). Neurofeedback Intervention for Adults with ADHD. *Journal of Adult Development*, 12, 123–130. <https://doi.org/10.1007/s10804-005-7028-6>

10.3 Artykuł 3

Baltic Journal of Health and Physical Activity

Volume 15 | Issue 4

Article 7

2023

Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test

Magdalena Pronczuk
Faculty of Physical Culture, Gdańsk University of Physical Education and Sport, Gdańsk, Poland,
nadsprawna@gmail.com

Tomasz Chamera
Faculty of Physical Culture, Gdańsk University of Physical Education and Sport, Gdańsk, Poland

Alicja Markiel
SWPS University, Katowice, Poland

Jerzy Markowski
Department of Laryngology, Faculty of Medical Sciences, Medical University of Silesia in Katowice, Poland

Jan Pilch
Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://www.balticsportscience.com/journal>

 Part of the [Health and Physical Education Commons](#), [Sports Medicine Commons](#), [Sports Sciences Commons](#), and the [Sports Studies Commons](#)

Recommended Citation

Pronczuk M, Chamera T, Markiel A, Markowski J, Pilch J, Zmijewski P, Maszczyk A. Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test. *Balt J Health Phys Act.* 2023;15(4):Article7. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.15.4.07>

This Article is brought to you for free and open access by Baltic Journal of Health and Physical Activity. It has been accepted for inclusion in Baltic Journal of Health and Physical Activity by an authorized editor of Baltic Journal of Health and Physical Activity.

Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test

Abstract

Introduction: This research aimed to investigate which waves, Theta or Beta, are significant predictors of visual simple and complex reaction times during the Vienna test, using regression modeling. The research material comprised the test results of male judo athletes ($n = 24$), selected through mixed sampling (purposive and random). The study was conducted in two cycles, differentiated by frequency but with the same duration of EEG biofeedback sessions, in both the control and experimental groups. The first cycle of the study consisted of 15 sessions held every other day. Each training session lasted for 4 minutes. The second series of studies, which took place after a six-week break, was characterized by a higher frequency of meetings (daily), with the duration of one training session remaining the same as in the previous cycle, i.e., 4 minutes. The impact of neurofeedback training on the visual reaction speed of judo athletes was verified using selected samples from the Vienna Test System (VTS). The study revealed that athletes from the experimental group, as a result of implementing the beta1/theta protocol, statistically significantly improved their simple and complex reaction times after each training cycle. Similar changes were not observed in the control group. The results suggest that neurofeedback training may significantly improve reaction skills in a sports context. However, for a fuller understanding and confirmation of these effects, further well-controlled studies are necessary.

Keywords

Beta waves, Theta waves, beta1/theta protocol, brain

Creative Commons License



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-No Derivative Works 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) License.

Cover Page Footnote

Authors

Magdalena Pronczuk, Tomasz Chamera, Alicja Markiel, Jerzy Markowski, Jan Pilch, Piotr Żmijewski, and Adam Maszczyk



Article

Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test

Magdalena PRONCZUK^{1*}, Tomasz CHAMERA², Alicja MARKIEL³, Jerzy MARKOWSKI⁴, Jan PILCH⁵, Piotr ŻMIJEWSKI⁶, Adam MASZCZYK^{7*}

- ¹ Faculty of Physical Culture, Gdansk University of Physical Education and Sport, Gdańsk, Poland; ORCID 0009-0005-1478-3151
- ² Faculty of Physical Culture, Gdansk University of Physical Education and Sport, Gdańsk, Poland; ORCID 0000-0002-5381-7634
- ³ SWPS University, Katowice, Poland; ORCID 0009-0005-9233-583X
- ⁴ Department of Laryngology, Faculty of Medical Sciences, Medical University of Silesia in Katowice, Poland; ORCID 0000-0003-3416-7354
- ⁵ Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland; ORCID 0000-0002-2682-4708
- ⁶ Department of Physical Education, The Józef Piłsudski University of Physical Education, Warsaw, Poland; ORCID 0000-0002-5570-9573
- ⁷ Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland; ORCID 0000-0001-9139-9747

* Correspondence: nadspawna@gmail.com; a.maszcyk@awf.katowice.pl

Citation: Pronczuk M, Chamera T, Markiel A, Markowski J, Pilch J, Zmijewski P, Maszcyk A. Influence of Beta and Theta waves as predictors of simple and complex reaction times in examined groups of judo athletes during the Vienna test. *Balt J Health Phys Act.* 2023;15(4): Article 7. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.15.4.07>

Academic Editor:
Aleksandra Bojarczuk

Received: March 2022
Accepted: October 2023
Published: December 2023

Publisher's Note: BJHPA stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2023 by Gdansk University of Physical Education and Sport. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY-NC-ND) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Introduction: This research aimed to investigate which waves, Theta or Beta, are significant predictors of visual simple and complex reaction times during the Vienna test, using regression modeling. The research material comprised the test results of male judo athletes ($n = 24$), selected through mixed sampling (purposive and random). The study was conducted in two cycles, differentiated by frequency but with the same duration of EEG biofeedback sessions, in both the control and experimental groups. The first cycle of the study consisted of 15 sessions held every other day. Each training session lasted for 4 minutes. The second series of studies, which took place after a six-week break, was characterized by a higher frequency of meetings (daily), with the duration of one training session remaining the same as in the previous cycle, i.e., 4 minutes. The impact of neurofeedback training on the visual reaction speed of judo athletes was verified using selected samples from the Vienna Test System (VTS). The study revealed that athletes from the experimental group, as a result of implementing the beta1/theta protocol, statistically significantly improved their simple and complex reaction times after each training cycle. Similar changes were not observed in the control group. The results suggest that neurofeedback training may significantly improve reaction skills in a sports context. However, for a fuller understanding and confirmation of these effects, further well-controlled studies are necessary.

Keywords: Beta waves, Theta waves, beta1/theta protocol, brain.

1. Introduction

The primary goal of the training process is to maximize the athletic achievements by refining athletes' technical and tactical skills and elevating their level of motor preparedness. In this journey towards achieving high sports results, psychological training focused on improving reaction time, which plays an increasingly significant role. The time and

adequacy of reaction are fundamental predispositions of a judo athlete. Scientific findings thus far have suggested that an athlete's greater mental endurance, including their ability to focus under competitive pressure, significantly influences improved performance during competition [1, 2, 3, 4].

High concentration and the associated heightened alertness achieved under optimal arousal conditions of the nervous system streamline cognitive processes and reduce reaction times [5, 6, 7, 8]. An analysis of the relationship between athletes' self-regulation abilities and their world ranking conducted by Dupee et al. [9] demonstrated that better management of physiology and emotions distinctly correlates with sports performance. Athletes who could not control their reactions to stress and succumbed to distraction held lower positions in the overall rankings [9].

In sports like judo, where visual attention and its contribution to decision-making and planning the appropriate motor response are crucial for the athlete's success, a high level of concentration and the ability to react quickly to visual stimuli are particularly important. Numerous analyses related to assessing the effectiveness of EEG-biofeedback training based on self-control of the heart rate and breathing frequency have been conducted to enhance the efficiency of actions taken by athletes.

The introduction of EEG-biofeedback training among elite wrestlers significantly improved their reaction times by mastering the skill of maintaining an optimal heart rate rhythm [10]. Similar results were obtained in a group of basketball players, where EEG-biofeedback training in the experimental group led to a significant improvement in response time to stimuli compared to the placebo and control groups [11]. In light of these findings, the EEG-biofeedback method appears to be an interesting approach that can support the development of the crucial skill of selective attention in elite sports, influencing the athletes' speed of stimulus processing and their effectiveness.

Simultaneously, it seems reasonable to apply training time that is adequate to the time of sports competition in a specific discipline or sports event. Therefore, our research aimed to investigate which waves, Theta or Beta, are significant predictors of visual simple and complex reaction times during the Vienna test, using regression modeling.

2. Materials and methods

2.1. Participants

The research material comprised the test results of male judo athletes, selected through mixed sampling (purposive and random). Each athlete was a member of the Polish National Team and held either an International Master Class (MM) or National Master Class (M) – purposive selection. The study was conducted on a group of 24 athletes, randomly divided into two subgroups: experimental ($n = 12$) and control ($n = 12$). Table 1 presents the descriptive statistics of individual groups.

Table 1. Descriptive statistics of characteristic variables for judo athletes (mean and SD).

Parameters	EG	CG
Age (y)	22 (± 3)	22 (± 2)
Body mass (kg)	74.8 (± 1.5)	75.3 (± 2.2)
Body high (cm)	174.2 (± 2)	174 (± 2.5)
BMI	23.8 (± 1.6)	23.6 (± 2.1)

EG – experimental group, CG – control group; BMI – Body Mass Index.

2.2. Procedures

All volunteers were healthy and were instructed to avoid taking medications, alcohol, and substances (such as caffeine and energy drinks) for 12 hours before the study. Additionally, within 24 hours prior to the examination, all volunteers were advised to refrain from strenuous resistance exercises. They were informed about the research

protocol, potential risks, and benefits of the study, and then provided written informed consent to participate in the research. Respondents had the right to withdraw from the study at any stage of the experiment. The protocol was approved by the Bioethics Commission for Scientific Research at the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice. Tests were conducted at the Human Psychomotor Laboratory of the AWF in Katowice, using the EEGDigiTrack MultiEEG_32 device.

The study was conducted in two cycles, differentiated by frequency but with the same duration of EEG biofeedback sessions, in both the control and experimental groups. The first cycle of the study consisted of 15 sessions held every other day. Each training session lasted for 4 minutes and was a modification of the Dupee training [12]. The second series of studies, which took place after a six-week break, was a modification of the Thompson training program [13], characterized by a higher frequency of meetings (daily), with the duration of one training session remaining the same as in the previous cycle, i.e., 4 minutes.

During each session, the percentage of time above the threshold was monitored, which was adjusted upward or downward for the reinforced and inhibited waves, so that the training difficulty level was optimal and adapted to the individual progress of each athlete. The basic training protocol in the experimental group was beta1/theta training, used to increase concentration and achieve the so-called "narrowing of attention" in athletes.

Before the start of the first and second training cycles, and after the completion of each cycle, simple and complex reaction times were assessed in both study groups. The control group followed the same schedule as the experimental group and had the same training duration and frequency. The preparation procedure for training was the same for both groups, but in the control group, instead of the beta1/theta protocol, an EEG simulation was displayed, independent of the brainwave patterns generated by the participant.

2.3. EEG biofeedback training

EEG biofeedback training was conducted using the EEGDigiTrack MultiEEG_32 device, whose quality was confirmed by ISO and CE certificates. Prior to EEG signal registration, the impedance level of electrodes and interelectrode levels were checked each time using the built-in impedance sensor. To initiate EEG biofeedback diagnostics and training, it was necessary to achieve an impedance level below 5 k Ω and inter-electrode measurements differing by no more than 1 k Ω .

Each training session in each cycle was preceded by a 3-minute single-channel diagnostic. During this time, participants were asked to perform the following tasks: sit with open eyes for one minute, sit with closed eyes for one minute, sit with open eyes with an additional activation task of counting down by 7 from 100. During the electrode reference diagnosis, the reference electrode was attached to the left earlobe, the grounding electrode to the right earlobe, and the active electrode at the Cz point, according to the international 10–20 system. During EEG biofeedback training, the active electrode was attached to the C3 point, allowing the main training goal to be achieved (developing the ability to maintain an optimal balance between the activity of fast (beta) and slow (theta) waves). During each EEG biofeedback session, the percentage of time above the threshold, which is the main measure of progress, was also monitored to optimize the training difficulty level for each athlete.

The recorded signals were filtered from 2 to 40 Hz. All signals were visually checked by an expert, and artifact-free periods were manually selected and further analyzed.

Feedback based on the activity recorded by the C3 electrode was provided in a visual and auditory form. During training, participants were asked to control images displayed on the computer screen so that the displayed airplane kept flying all the time. The airplane was in motion while meeting the following conditions: amplitudes of the theta (4–7.5 Hz) and beta2 (20–30 Hz) bands remained below the established threshold, and the amplitudes of SMR (12–15 Hz) and beta1 (13–20 Hz) were maintained above the established threshold. Effective movement of the airplane was accompanied by an acoustic reinforcing signal.

2.4. Visual Reaction Time Tests

The impact of neurofeedback training on the visual reaction speed of judo athletes was verified using selected samples from the Vienna Test System (VTS). The Reaction Time (RT) test was used, allowing the precise determination of the athlete's reaction time to the thousandth of a second. The test measured how quickly the athlete could react to the appearance of a stimulus as well as what the quality of the reaction was in situations with multiple stimuli requiring selection and while maintaining reaction time. The test allowed the measurement of simple and complex reaction times. The test was performed using a reaction panel – one of the reaction devices of the Vienna Test System. Tests were conducted in the morning, under conditions conducive to focusing attention on tasks. All tests were repeated twice with a 5-minute interval, with the better results taken for further analysis. The participant's task was to react as quickly as possible to simultaneous visual and acoustic signals (complex reaction) or only visual (simple reaction) by pressing a button on the reaction panel when a yellow light appeared on the screen. The test measured the indicator – average reaction time (MRT) – calculated from the appearance of the relevant stimulus to the moment the finger was lifted from the waiting button. The obtained result was the reaction time.

2.5. Statistical analysis

The normality of the distribution of variables was checked with the Shapiro-Wilk test. Levene's test of homogeneity of variances was used to verify the homogeneity of variables and determine statistical tools. The results of the conducted tests clearly indicated that the variables had a normal distribution or a distribution close to normal ($p > 0.05$). The examined homogeneity of variance with Levene's test in groups before training showed no similarities, i.e., homogeneity for all variables. Variable values in both groups after training in the Levene's test were also homogeneous.

To answer the hypotheses regarding testing for no differences between the means in simple and complex reaction time tests before and after EEG-biofeedback training, an analysis of variance (ANOVA) was applied. In the first part of the study, ANOVA was used to determine significant differences between the tested simple reaction time variables concerning groups after individual biofeedback session cycles. In the next step, using the same analysis, differences in the experimental group were examined in the context of both reaction times, taking into account the periods before and after the cycles.

In the final third stage of the study, regression models were built to determine the most significant predictors for each cycle, considering both reaction times. The relationships between the dependent variable (visual reaction time) and other analyzed variables (Theta and Beta values) were estimated using single-factor stepwise ridge regression analysis.

After simplification, the biometric regression model received the following form (equation (1)): $Y = F(x_1, \dots, x_k; a_1, \dots, a_p) + \varepsilon = F(x, a) + \varepsilon$ (1) where: x_j – determinant variable ($x = [x_1, \dots, x_k]^T$), a_j – parameter ($a = [a_1, \dots, a_p]^T$), ε – random component (also known as random factor or measurement error).

In summary, additional statistical data analysis was performed using the Statistica program (StatSoft-Poland, Statistica 13, Krakow, Poland, version 2022).

3. Results

Table 2 presents the results of the analysis of variance at the level of statistical significance $p < 0.05$, which showed that hypotheses about no differences between the experimental and control groups regarding the values of the tested simple and complex reaction times after EEG biofeedback training sessions could be rejected. However, Tables 3 and 4 present the results of post-hoc tests for the average simple and complex reaction time (VST) between the analyzed groups.

Table 2. ANOVA results for determining significant differences between the tested simple and complex reaction times variables concerning groups after individual biofeedback session cycles.

Variables	F	p
After the 2 nd cycle – simple reaction (VST)	15.897	0.006
After the 1 st cycle – simple reaction (VST)	41.317	0.002
After the 2 nd cycle – complex reaction (VST)	15.262	0.008
After the 1 st cycle – complex reaction (VST)	47.788	0.001

Table 3. Tukey's post-hoc test for simple reaction time (VST) after the 1st and 2nd cycles of EEG biofeedback sessions in the control and experimental groups, with $p < 0.05$.

Group	EG	CG
Differential means	0.214 s	0.225 s
simple reaction time EG after the 2 nd cycle		0.006
simple reaction time CG after the 2 nd cycle	0.006	
Differential means	0.207 s	0.224 s
simple reaction time EG after the 1 st cycle		0.002
simple reaction time CG after the 1 st cycle	0.002	

Table 4. Tukey's post-hoc test for complex reaction time (VST) after the 1st and 2nd cycles of EEG biofeedback sessions in the control and experimental groups, with $p < 0.05$.

Group	EG	CG
Differential means	0.339 s	0.355 s
complex reaction time EG after the 2 nd cycle		0.008
complex reaction time CG after the 2 nd cycle	0.008	
Differential means	0.326 s	0.352 s
complex reaction time EG after the 1 st cycle		0.001
complex reaction time CG after the 1 st cycle	0.001	

After conducting individual cycles of EEG biofeedback training, beneficial changes were observed only in the experimental group. There were statistically significant differences between the control and experimental groups in the results of simple and complex reaction times in selected Vienna Test System samples. Therefore, further analyses focusing on the experimental group to address the research problem.

For the variables of simple and complex reaction times in selected Vienna Test System samples, presented in Table 5, one-way analysis of variance (ANOVA) at the significance level of $p < 0.05$ indicated that the hypotheses of no differences between the values of the studied variables before and after the application of individual cycles of EEG biofeedback could be rejected.

The determined regression models indicating statistically significant predictors of obtained simple and complex reaction times in the examined experimental group of judo athletes during the Vienna Test have taken the form of regression functions and are presented below.

- In the second cycle (2nd cycle Simple reaction time VST): $Y1_IIC - SRT-VST = 0.222 - 0.001 * \text{mean Theta}$.

This means that if the value of the mean theta variable increases by one unit, the average score value ((Y1_IIC - SRT-VST) will decrease by 0.001 s. The analysis also showed that the most important predictor for the variable Y1_IIC - SRT-VST was the mean Theta.

- In the second cycle (2nd cycle Complex Reaction Time VST): $Y2_IIC - CRT-VST = 0.358 - 0.002 * \text{mean Theta}$.

This means that if the value of the mean theta variable increases by one unit, the average score value ($Y2_IIC - CRZW$) will decrease by 0.002 s. The analysis also showed that the most important predictor for the variable $Y2_IIC - CRZW$ was the mean Theta.

- In the first cycle (1st cycle Simple reaction time VST): $Y3_IC - SRT-VST = 0.216 - 0.001 * \text{mean Theta}$.

This means that if the value of the mean theta variable increases by one unit, the average score value ($Y3_IC - SRT-VST$) will decrease by 0.001 seconds. The analysis also showed that the most important predictor for the variable $Y3_IC - SRT-VST$ was the mean Theta.

- In the first cycle (1st cycle Complex Reaction Time VST): $Y4_IC - CRT-VST = 0.336 - 0.002 * \text{mean Beta}$.

This means that if the value of the mean beta variable increases by one unit, the average score value ($Y4_IC - CRT-VST$) will decrease by 0.002 seconds. The analysis also showed that the most important predictor for the variable $Y4_IC - CRT-VST$ was the mean Beta.

Table 5. Result of one-way ANOVA to determine the significance of changes in simple and complex reaction times in selected Vienna Test System samples in the experimental group.

Variables	$\bar{x}$ [s]	S [s]	p
Simple reaction time (VST)			
Before the 2 nd cycle	0.223	0.006	0.001
After the 2 nd cycle	0.214	0.005	
Before the 1 st cycle	0.222	0.006	0.001
After the 1 st cycle	0.207	0.004	
Complex reaction time (VST)			
Before the 2 nd cycle	0.353	0.01	0.001
After the 2 nd cycle	0.339	0.009	
Before the 1 st cycle	0.351	0.011	0.001
After the 1 st cycle	0.326	0.006	

4. Discussion

Sporting achievements are the result of a prolonged, individually planned, and comprehensive training process, encompassing the technical-tactical, fitness, and psychological preparation of the athlete. For a sports training system to fulfill its primary purpose – leading to an increase in athletic performance in line with the athlete's real potential – it requires continuous improvement, modification, and expansion of the tools and training methods used. Many athletes and coaches emphasize the significance of the psychological aspect in the athlete's training process, considering it a crucial element necessary for achieving success at the highest level [14]. Proper mental preparation positively influences not only better coping under competitive pressure but also aids in dealing with training challenges, facilitating the maintenance of adequate motivation and heightened concentration despite increasing fatigue. This, in turn, positively impacts training efficiency. However, psychological preparation in sports is often still marginalized or solely focuses on achieving athletes' psychological readiness, with interventions carried out directly before competition. Psychological practices are seldom utilized throughout the entire training process to enhance athletes' training effectiveness [15].

This research aimed to determine the impact of neurofeedback training, especially targeting Beta and Theta waves, on simple and complex reaction times in judo athletes. It analyzed the relationship between brain wave activity and reaction skills in a sports context. The study continued previous findings in sports psychology, emphasizing the importance of psychological training, especially regarding the ability to maintain an optimal level of concentration and reaction under pressure. The significance of reaction time in sports, particularly in disciplines like judo, where quick and precise reactions to visual stimuli are crucial for success, was highlighted.

Due to the significant importance of judo athletes' visual reaction time in enhancing their effectiveness during matches, this study aimed to investigate the impact of EEG biofeedback training. The training was based on the reinforcement of fast Beta waves and the inhibition of slow Theta waves, targeting the efficiency of their visual processing. An attempt was also made to develop an optimal EEG biofeedback training, directed towards regulating concentration levels and improving the visual attention of judo athletes, leading to a reduction in their reaction times. There is compelling evidence suggesting that the beta wave frequency correlates with a state of increased visual attention processing [16], which is crucial in decision-making and reaction planning [17]. The authors also point out that beta activity in the motor cortex is associated with achieving faster motor responses to stimuli. Based on these findings, the present study decided to implement the beta1/theta training protocol to enhance the visual reaction speed of judo athletes.

The research was conducted among a selected group of athletes, members of the national team of the Polish Judo Association. The innovation of the applied neurofeedback training lay in its implementation in two cycles, varied in terms of the duration and frequency of individual training sessions. This ensured alternative measurement conditions, allowing the identification of the most favorable configuration. The obtained results were then subjected to a detailed statistical analysis, enabling a precise assessment of the applied training procedures in relation to the reaction times achieved in both research groups.

The study revealed that athletes from the experimental group, as a result of implementing the beta1/theta protocol, statistically significantly improved their simple and complex reaction times after each training cycle. Similar changes were not observed in the control group. This, however, confirms previous scientific findings indicating that athletes can learn to generate specific neuronal brain activity, leading to an increase in their efficiency [18]. It also complements existing analyses regarding the positive impact of various biofeedback training methods on visual perception and the reduction of athletes' reaction times [19].

The obtained results are also consistent with previous reports suggesting that strengthening beta1 wave activity and inhibiting Theta waves over the motor cortex improve processes related to visual attention. Early studies showed that beta band synchronization just before the appearance of a stimulus was the strongest predictor of task execution speed [20]. EEG biofeedback training conducted among two research groups, where the first group reinforced Theta waves and the second inhibited this frequency, demonstrated increased performance in a test task after reducing theta activity. This also proved the possibility of selectively changing the frequency of brain waves [21, 22]. However, a limitation of this study was the small number of training sessions and the lack of monitoring other changes in neuronal activity accompanying the reduction in Theta waves, making it impossible to determine whether this reduction was associated with an increase in alpha, beta, or a combination of both frequencies.

Hanslmayr et al. [23] demonstrated that the perception of stimuli was associated with lower activation in the Alpha band and greater engagement with Beta and Gamma frequencies. It was concluded that based on the analysis of these values, inferences could be made about the subjects' visual attention state [23]. Similar observations were made by recording increased beta activity during the anticipation period before a stimulus [16,24]. Subsequent analyses also confirmed that greater activation in the beta band (especially in

parietal areas) before the exposure to a visual stimulus was associated with shorter reaction times [25].

Egner and Gruzelier [24] examined the effectiveness of applying SMR and beta1 protocols in improving perceptual abilities. Participants were divided into three groups – the first group reinforced SMR waves, the second group reinforced beta1 waves, and the third, a control group, did not undergo any intervention. The analysis of the results showed increased perceptual sensitivity in the SMR group and a significant reduction in reaction times in the beta1 group, with no statistically significant differences in the control group [24]. Ghaziri et al. [26], after analyzing the impact of EEG biofeedback training on concentration, also observed increased visual and auditory attention efficiency due to beta1 band stimulation. Moreover, they demonstrated structural changes in white and gray matter as a result of the neurofeedback intervention, providing evidence of its effectiveness [26].

These findings align with the results presented in this study, indicating the positive impact of reinforcing the beta1 band at the C3 point in improving the visual reaction time of judo athletes. They also confirm previous reports suggesting that beta band activation during open eyes in the left hemisphere may be a predictor of training success [27]. EEG biofeedback training based on the beta1 protocol, conducted by Gruzelier et al. [28] at the C3 point, resulted in positive changes such as a reduced number of errors and less variability in reaction times [28]. Similar observations were made in this study, where favorable modifications in the reaction times of judo athletes were achieved after EEG biofeedback training conducted at the C3 point. This reaffirms the effective impact of interventions based on reinforcing beta1 waves in this area concerning the development of athletes' visual attention.

The study used EEG-biofeedback, a method based on self-regulation of brain wave frequencies, especially Beta and Theta waves. The conducted training sessions and their impact on improving simple and complex reaction times were analyzed. It is worth noting that this study focuses on a group of judo athletes with varying skill levels, adding context to the relationship between skill level and training effectiveness. The research aligns with general concepts in neurofeedback, which can be essential in analyzing the results of studies on its effectiveness in sports [29].

In the study investigating the impact of neurofeedback training on the reaction times of judo athletes, attention was drawn to the comprehensive nature of the sports training process. Sporting achievements result from prolonged efforts, which involve not only technical-tactical and fitness preparation but also a significant psychological aspect. There is a widespread belief among athletes and coaches that proper mental preparation is crucial for achieving success at the highest level [14].

Emphasizing the role of psychology in training, the study focused on neurofeedback training, especially on Beta and Theta waves associated with brain activity. The EEG-biofeedback method was employed, enabling self-regulation of brain wave frequencies. The psychological aspect is, therefore, crucial in sports, as also indicated by studies by other authors [1, 2, 3, 4]. Similarly, the issue of the frequency and intensity of biofeedback training, which is associated with fatigue [6, 7].

It is valuable to consider the context related to the skill levels of judo athletes, adding depth to the analysis. The study aimed not only to improve results but also to understand how brain wave activity influences reaction skills in the context of a specific sport, such as judo. It is crucial to note that reaction time is significant in judo, where quick and precise reactions are key to success.

However, while the results are promising, further research is needed, especially considering a larger number of participants and analyzing the long-term effects of training. Additionally, the authors could consider incorporating other factors into the analysis, such as stress levels or fatigue, which may also influence the reaction time.

5. Conclusions

In summary, the study on the impact of EEG-biofeedback training focused on Beta and Theta waves on simple and complex reaction times in judo athletes during the Vienna Test seems promising. The results suggest that neurofeedback training may significantly improve reaction skills in a sports context. However, for a fuller understanding and confirmation of these effects, further well-controlled studies are necessary. Long-term observations and those considering additional factors may provide a more comprehensive picture of the impact of psychological training on athletic achievements.

6. Practical implications

In the context of sports practice, the results of this study have potential implications for coaches, sports psychologists, and judo athletes. It appears that EEG-biofeedback training, focused on regulating Beta and Theta waves, could be an effective tool in improving reaction times. The application of this type of training may be particularly beneficial for sports where a quick reaction to stimuli is crucial, such as judo. Coaches may consider integrating neurofeedback training into training programs to enhance their athletes' psychological effectiveness. However, due to individual differences among athletes, it is essential to tailor the training to the specific needs of each athlete.

7. Study limitations

It is also important to note several limitations of this study. Firstly, the research sample was relatively small, which may impact the overall representativeness of the results. Therefore, these findings should be considered preliminary, and they require confirmation in larger research groups. Secondly, the analysis did not account for other potential factors influencing reaction time, such as fatigue or stress levels. Including these variables in further research could provide a more comprehensive picture, especially considering the physical demands of combat sports.

8. Directions for future research

Based on the results of this study, certain directions for future research are suggested. It would be crucial to expand the research sample, consider different levels of sports proficiency, and analyze the long-term effects of EEG-biofeedback training. Additionally, researchers could contemplate incorporating other forms of psychological training to compare their effectiveness with neurofeedback training. Comparing different methods could yield valuable insights into optimal strategies for enhancing athletes' reaction skills.

Finally, further studies should also take into account practical aspects of implementing neurofeedback training into training programs, such as equipment availability and training time requirements. Ultimately, a holistic approach to the psychological preparation of athletes requires consideration of various effective strategies, each tailored to athletes' individual needs.

References

1. Golby J, Sheard M, Lavallee D. A cognitive behavioural analysis of mental toughness in national rugby league football teams. *Percept Motor Skill*. 2003;96:455–462.
2. Nicholls AR, Polman RCJ, Backhouse SH, Levy AR. Mental toughness in sport: Achievement level, gender, age, experience and sport type differences. *Pers Individ Differ*. 2009;47(1):73–75. DOI: 10.1016/j.paid.2009.02.006
3. Jones G, Hanton S, Connaughton D. A framework for mental toughness in the world's best performers. *Sport Psychol*. 2007;21:243–264. DOI: 10.1123/tsp.21.2.243
4. Thelwell RC, Such BA, Weston NJV, Such JD, Greenlees IA. Developing mental toughness: Perceptions of elite female gymnasts. *Int J Sport Exerc Psychol*. 2010;8(2):170–188. DOI: 10.1080/1612197X.2010.9671941
5. Kaur P, Paul M, Sandhu JS. Auditory and visual reaction time in athletes, healthy controls, and patients of type I diabetes mellitus: A comparative study. *Int J Diabetes Develop Countr*. 2006;26:112–5. DOI: 10.4103/0973-3930.32170

6. Rietjens GJ, Kuipers H, Adam JJ, Saris WH, van Breda E, van Hamond D, Keizer HA. Physiological, biochemical and psychological markers of strenuous training-induced fatigue. *Int J Sport Med*. 2005;26(1):16–26. DOI: 10.1055/s-2004-817914
7. Decroix L, Piacentini MF, Rietjens G, Meeusen R. Monitoring physical and cognitive overload during a training camp in professional female cyclists. *Int J Sport Physiol Perform*. 2016;11(7):933–939. DOI: 10.1123/ijspp.2015-0570
8. Le Meur Y, Hausswirth C, Natta F, Couturier A, Bignet F, Vidal PP. A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *J Appl Physiol*. 2013;114(3):411–420. DOI: 10.1152/japplphysiol.01254.2012
9. Dupee M, Werthner P, Forneris T. A preliminary study on the relationship between athletes' ability to self-regulate and world ranking. *Biofeedback*. 2015;43(2):57–63. DOI: 10.5298/1081-5937-43.2.01
10. Vaschillo EG, Vysochin YV, Rishé N. RSA biofeedback as an effective relaxation method. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 1998;23(2):136–137.
11. Paul M, Garg K, Singh Sandhu J. Role of biofeedback in optimizing psychomotor performance in sports. *Asia J Sport Med*. 2012;3(1):29–40. DOI: 10.5812/asjsm.34722
12. Dupee M, Forneris T, Werthner P. Perceived outcomes of a biofeedback and neurofeedback training intervention for optimal performance: Learning to enhance self-awareness and self-regulation with Olympic athletes. *Sport Psychol*. 2016;30(4):339–349. DOI: 10.1123/isp.2016-0028
13. Thompson T, Steffert T, Ros T, Leach J, Gruzelier J. EEG applications for sport and performance. *Methods*. 2008;45(4):279–288. DOI: 10.1016/j.jymeth.2008.07.006
14. Williams JM, Krane V. Psychological characteristics of peak performance. In Williams JM. (Editor), *Applied sport psychology: Personal growth to peak performance*. Vol. 4. 2001, 137–147.
15. Raalte J, Petitpas A. Sport psychology service provision at elite international competitions. In Hung T, Lidor R, Hackfort D. (Eds.), *Psychology of Sport Excellence: Fitness Information Technology*. 2009, 45–52.
16. Engel AK, Fries P. Beta-band oscillations – signaling the status quo? *Curr Opin Neurobiol*. 2010;20(2):156–165. DOI: 10.1016/j.conb.2010.02.015
17. Janelle CM. Anxiety, Arousal and visual attention: A mechanistic account of performance variability. *J Sport Sci*. 2002;20:237–251. DOI: 10.1080/026404102317284790
18. Engelbrecht HJ, Keiser D, van Eijk L, Suiker EM, Eichhorn D, Karch S, Deijen JB, Pogarell O. Short and long-term effects of sham-controlled prefrontal EEG – neurofeedback training in healthy subjects. *Clin Neurophysiol*. 2016;127(4):1931–1937. DOI: 10.1016/j.clinph.2016.01.004
19. Christie S, Werthner P. Prestart psychophysiological profile of a 200-m canoe athlete: A comparison of best and worst reaction times. *Biofeedback*. 2015;43(2):73–83. DOI: 10.5298/1081-5937-43.2.05
20. Thompson T, Steffert T, Ros T, Leach J, Gruzelier J. EEG applications for sport and performance. *Methods*. 2008;45(4):279–288. DOI: 10.1016/j.jymeth.2008.07.006
21. Sherlin LH, Larson NC, Sherlin RM. Developing a performance brain training™ approach for baseball: A process analysis with descriptive data. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2013;38(1):29–44. DOI: 10.1007/s10484-012-9205-2
22. Sherlin LH, Ford N, Baker AR, Troesch J. Observational report of the effects of performance brain training in collegiate golfers. *Biofeedback*. 2015;43(2):64–72. DOI: 10.5298/1081-5937-43.2.06
23. Hanslmayr S, Aslan A, Staudigl T, Klimesch W, Herrmann CS, Bauml K. Prestimulus oscillations predict visual perception performance between and within subjects. *NeuroImage*. 2007;37(4):1465–1473. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.07.011
24. Egner T, Gruzelier JH. EEG Biofeedback of low beta band components: Frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clin Neurophysiol*. 2004;115(1):131–139. DOI: 10.1016/S1388-2457(03)00353-5
25. Kamiński J, Brzezicka A, Gola M, Wróbel A. Beta band oscillations engagement in human alertness process. *Int J Psychophysiol*. 2012;85(1):125–128. DOI: 10.1016/j.jpsycho.2011.11.006
26. Ghaziri J, Tucholka A, Larue V, Blanchette-Sylvestre M, Reybum G, Gilbert G, Lévesque J, Beauregard M. Neurofeedback training induces changes in white and gray matter. *Clin EEG Neurosci*. 2013;44(4):265–272. DOI: 10.1177/1550059413476031
27. Cherapkina L. Neurofeedback: successfulness and electroencephalogram changes in sportsmen of different qualification. *J Novel Physiotherap*. 2013;3:145. DOI: 10.4172/2165-7025.1000145
28. Gruzelier J, Egner T, Vernon D. Validating the efficacy of neurofeedback for optimizing performance. In Neuper C, Klimesch W. (Eds.), *Event-related dynamics of brain oscillations: Progress in brain research*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2006, 159, 421–432. DOI: 10.1016/S0079-6123(06)59027-2
29. Thompson M, Thompson L. *The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology*. Wheat Ridge, CO: Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback; 2003.

Author Contributions: Study Design, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM; Data Collection, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM; Statistical Analysis, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM; Data Interpretation, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM; Manuscript Preparation, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM; Literature Search, MP, TC, AIM, JM, JP, PZ, and AM. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The research project was approved by the Committee of Bioethics at the Academy of Physical Education in Katowice. The authors declare no conflict of interest.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: Data available from the corresponding author on request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.