



**Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego
w Warszawie**

mgr Kinga Rębiś

**Ocena użyteczności pomiarów utlenowania mięśni do
monitorowania odpowiedzi wysiłkowej wysoko wytrenowanych
zawodników i osób nietreningujących**

Promotor rozprawy doktorskiej

dr hab. prof. AWF Andrzej Klusiewicz

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej

dr Michał Starczewski

Rozprawa doktorska w oparciu o cykl publikacji naukowych
w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu
w dyscyplinie nauki o kulturze fizycznej

Warszawa, marzec 2026

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

1. Świadom/a odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca doktorska na temat:

**„Ocena użyteczności pomiarów utlenowania mięśni do monitorowania odpowiedzi
wysiłkowej wysoko wytrenowanych zawodników i osób nietreningujących”**

została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

2. Oświadczam, że praca doktorska nie narusza praw autorskich na podstawie ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. 2019 poz. 1231 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym.
3. Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia doktora.
4. Oświadczam ponadto, że treść pracy przekazanej na zewnętrznym nośniku elektronicznym jest identyczna z wersją przyjętą przez promotora i dostarczoną w formie papierowej.

19.03.2026

Data

[Redacted Signature]

Podpis autora pracy

19.03.2026

Data

[Redacted Signature]

podpis promotora pracy przyjmującego oświadczenie

Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej:

Wykaz czterech opublikowanych prac, które stanowią podstawę w ubieganiu się o tytuł doktora nauk o kulturze fizycznej, opublikowane po uzyskaniu stopnia magistra fizjoterapii, objęte wspólnym tytułem:

„Ocena użyteczności pomiarów utlenowania mięśni do monitorowania odpowiedzi wysiłkowej wysoko wytrenowanych zawodników i osób nietreningujących”.

W trzech, monotematycznych pracach cyklu doktorantka jest pierwszym autorem, z decydującym (powyżej 50%) wkładem, na każdym etapie powstawania i pisania pracy (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie badań, analiza wyników, pisanie artykułu). W jednej pracy z zakresu tej samej tematyki doktorantka jest kolejnym autorem.

1. Klusiewicz A., **Rębiś K.**, Ozimek M., Czaplicki A. The use of muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the aerobic training loads of world-class rowers. *Biol Sport*. 2021;38(4):713–719. doi: 10.5114/biolSport.2021.103571. Punkty MNiSW: 100; IF: 2,806.
2. **Rębiś K.**, Sadowska D., Starczewski M., Klusiewicz A. Usefulness of portable device to establish differences in muscle oxygenation between the Wingate test and graded exercise test: Effect of gender on anaerobic and aerobic capacity in speed skaters. *Front. Physiol*. 2022;13:809864. doi: 10.3389/fphys.2022.809864. Punkty MNiSW: 100; IF: 4,566.
3. **Rębiś K.**, Klusiewicz A., Długołęcka B., Różański P., Kowieski K., Kowalski T. Estimation of lactate thresholds for muscle oxygenation in high-trained speed skaters, and healthy, non-training individuals. *J. Clin. Med*. 2024, 13(17), 5340. doi: 10.3390/jcm13175340. Punkty MNiSW: 140; IF: 2,900
4. **Rębiś K.**, Kowalski T., Michalik K., Klusiewicz A. Transferability of exercise intensity based on muscle oxygenation from normoxia to hypoxia in ski-mountaineering athletes - exploratory study. *Sports* 2024, 12, 351. doi: 10.3390/sports12120351. Punkty MNiSW: 20; IF: 2,900

Bibliometryczne podsumowanie jednotematycznego cyklu czterech prac naukowych:

IF = 13,172, MNiSW = 360

Wykaz publikacji wraz z wniesionym wkładem współautorów

Publikacja 1:

Klusiewicz A., Rębiś K., Ozimek M., Czaplicki A. The use of muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the aerobic training loads of world-class rowers. Biol Sport. 2021;38(4):713–719. doi: 10.5114/biol sport.2021.103571

Nazwisko i imię współautora	Oświadczenie o wniesieniu wkładu
Kinga Rębiś - doktorant	Koncepcja i projekt (20%) Gromadzenie danych (60%) Analiza i interpretacja (60%) Pisanie i edycja (40%)
Andrzej Klusiewicz - współautor	Koncepcja i projekt (80%) Gromadzenie danych (40%) Analiza i interpretacja (20%) Pisanie i edycja (40%)
Mariusz Ozimek - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (0%) Pisanie i edycja (10%)
Adam Czaplicki - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (20%) Pisanie i edycja (10%)

Publikacja 2:

Rębiś K., Sadowska D., Starczewski M., Klusiewicz A. Usefulness of portable device to establish differences in muscle oxygenation between the Wingate test and graded exercise test: Effect of gender on anaerobic and aerobic capacity in speed skaters. Front. Physiol. 2022;13:809864. doi: 10.3389/fphys.2022.809864

Nazwisko i imię współautora	Oświadczenie o wniesieniu wkładu
Kinga Rębiś - doktorant	Koncepcja i projekt (50%) Gromadzenie danych (85%) Analiza i interpretacja (60%) Pisanie i edycja (50%)
Andrzej Klusiewicz - współautor	Koncepcja i projekt (50%) Gromadzenie danych (15%) Analiza i interpretacja (15%) Pisanie i edycja (30%)
Dorota Sadowska - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (15%) Pisanie i edycja (10%)
Michał Starczewski - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (10%) Pisanie i edycja (10%)

Publikacja 3:

Rębiś K., Klusiewicz A., Długolecka B., Różański P., Kowieski K., Kowalski T.

Estimation of lactate thresholds for muscle oxygenation in high-trained speed skaters, and healthy, non-training individuals. J. Clin. Med. 2024, 13(17), 5340. doi:

10.3390/jcm13175340.

Nazwisko i imię współautora	Oświadczenie o wniesieniu wkładu
Kinga Rębiś - doktorant	Koncepcja i projekt (50%) Gromadzenie danych (55%) Analiza i interpretacja (65%) Pisanie i edycja (60%)
Andrzej Klusiewicz - współautor	Koncepcja i projekt (40%) Gromadzenie danych (15%) Analiza i interpretacja (20%) Pisanie i edycja (30%)
Barbara Długolecka - współautor	Koncepcja i projekt (5%) Gromadzenie danych (10%) Analiza i interpretacja (5%) Pisanie i edycja (5%)
Paweł Różański - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (10%) Analiza i interpretacja (0%) Pisanie i edycja (0%)
Karol Kowieski - współautor	Koncepcja i projekt (0%) Gromadzenie danych (10%) Analiza i interpretacja (0%) Pisanie i edycja (0%)
Tomasz Kowalski - współautor	Koncepcja i projekt (5%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (10%) Pisanie i edycja (5%)

Publikacja 4:

Rębiś K., Kowalski T., Michalik K., Klusiewicz A. Transferability of exercise intensity based on muscle oxygenation from normoxia to hypoxia in ski-mountaineering athletes - exploratory study. Sports 2024, 12, 351. doi: 10.3390/sports12120351.

Nazwisko i imię współautora	Oświadczenie o wniesieniu wkładu
Kinga Rębiś - doktorant	Koncepcja i projekt (80%) Gromadzenie danych (80%) Analiza i interpretacja (70%) Pisanie i edycja (65%)
Tomasz Kowalski - współautor	Koncepcja i projekt (10%) Gromadzenie danych (20%) Analiza i interpretacja (20%) Pisanie i edycja (20%)
Andrzej Klusiewicz - współautor	Koncepcja i projekt (5%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (10%) Pisanie i edycja (5%)
Kamil Michalik - współautor	Koncepcja i projekt (5%) Gromadzenie danych (0%) Analiza i interpretacja (0%) Pisanie i edycja (10%)

Spis treści

Spis treści	8
Streszczenie w języku polskim	11
Streszczenie w języku angielskim.....	13
1. Wstęp.....	15
1.1. Urządzenia NIRS.....	16
1.2. Zastosowanie technologii NIRS do pomiaru utlenowania mięśni w sporcie.....	17
1.3. Kierunki rozwoju badań z zastosowaniem technologii NIRS.....	19
1.4. Uzasadnienie prowadzonych badań	21
2. Cel pracy i pytania badawcze	24
3. Materiał i metody badań.....	26
3.1. Charakterystyka badanych grup	26
3.2. Metody badań.....	26
3.3. Statystyczna analiza danych.....	32
4. Wyniki badań	33
5. Dyskusja	48
6. Wnioski	54
7. Piśmiennictwo	56
8. Spis tabel i rycin.....	67

Wykaz skrótów:

AT₂ – z ang. *aerobic threshold* – próg tlenowy dla stężenia mleczanu we krwi odpowiadający 2 mmol/l

AT₄ – z ang. *anaerobic threshold* – próg beztlenowy dla stężenia mleczanu we krwi odpowiadający 4 mmol/l

ATT – z ang. *adipose tissue thickness* – grubość podskórnej tkanki tłuszczowej

GXT – z ang. *graded exercise test* – test stopniowany o wzrastającej intensywności

Hb – z ang. *haemoglobin* – hemoglobina

HbO₂ – z ang. *oxyhaemoglobin* – utlenowana hemoglobina

HR – z ang. *heart rate* – częstość skurczów serca

HR_{AT} – z ang. *heart rate at anaerobic threshold* – częstość skurczów serca na poziomie progu beztlenowego

LA – z ang. *lacid acid* – stężenie mleczanu we krwi

LT – z ang. *lactatic threshold* – próg mleczanowy

MAP – z ang. *maximal aerobic power* – maksymalna moc tlenowa

Mb – z ang. *myoglobin* – mioglobina

MbO₂ – z ang. *oxymyoglobin* – utlenowana mioglobina

mDmax – z ang. *Modified Maximum Distance method* – zmodyfikowana metoda Dmax do wyznaczania indywidualnego progu beztlenowego

MLSS – z ang. *maximal lactate steady state* – stan maksymalnej równowagi mleczanowej

NIRS – z ang. *near-infrared spectroscopy* – spektroskopia w bliskiej podczerwieni

RER – z ang. *respiratory exchange ratio* – współczynnik wymiany oddechowej

SmO₂ – z ang. *muscle oxygen saturation* – utlenowanie mięśni

SmO₂AT₄ – z ang. muscle oxygenation at anaerobic threshold corresponding to 4 mmol/L lactate – SmO₂ wyznaczone dla 4 mmol progu beztlenowego

SmO₂Dmax – z ang. muscle oxygenation at anaerobic threshold corresponding to *Modified Maximum Distance* method – SmO₂ wyznaczone dla progu beztlenowego mDmax

SmO₂HTR – z ang. *half time for SmO₂ to return to resting level* – połowa czasu potrzebnego do powrotu SmO₂ do poziomu spoczynkowego

ΔSmO₂ – różnica SmO₂ między wartościami spoczynkowymi a minimalnymi podczas wysiłku

THb – z ang. *total haemoglobin* – hemoglobina całkowita

TOI – z ang. *tissue oxygenation index* – indeks utlenowania tkanek

TSI_T – z ang. *anaerobic threshold determined from muscle oxygenation* – próg beztlenowy wyznaczony z pomiarów utlenowania mięśni

VO₂max – z ang. *maximal oxygen uptake* – maksymalny pobór tlenu

WAnT – z ang. *Wingate Anaerobic Test* – test wydolności beztlenowej Wingate

Streszczenie w języku polskim

Ocena użyteczności pomiarów utlenowania mięśni do monitorowania odpowiedzi wysiłkowej wysoko wytrenowanych zawodników i osób nietrenujących

W ostatnich kilkunastu latach do praktyki treningowej wprowadzono mobilne urządzenia pomiarowe, które wykorzystują światło podczerwieni (ang. *near-infrared spectroscopy*, NIRS) do oceny stopnia utlenowania mioglobiny w cytoplazmie mięśni i hemoglobiny w naczyniach krwionośnych mikrokążenia mięśniowego (ang. *muscle oxygen saturation*, SmO₂). Pomiary NIRS podczas wysiłku dostarczają w czasie rzeczywistym informacji o lokalnym wykorzystaniu tlenu w pracujących mięśniach, natomiast w okresie restytucji powysiłkowej pozwalają ocenić czas, w którym SmO₂ wraca do stanu spoczynkowego. Mając na względzie zalety tej nowej, nieinwazyjnej metody w diagnostyce wysiłkowej, jako cel badań przyjęto ocenę użyteczności pomiarów utlenowania mięśni do określania fizjologicznej odpowiedzi organizmu u wysoko wytrenowanych zawodników i osób nietrenujących na różnego rodzaju wysiłki testowe. Badaniami objęto łącznie 79 osoby (26 kobiety i 53 mężczyzn) o zróżnicowanym stopniu wytrenowania. Wśród badanych zawodników liczną grupę stanowili czołowi sportowcy należący do Kadry Narodowej Polski. Badani wykonali testy: submaksymalny odpowiadający stanowi maksymalnej równowagi mleczanowej (MLSS), supramaksymalny (test Wingate, WAnT) i maksymalny o stopniowanej intensywności. W zależności od rodzaju testu wykonano pomiary: wymiany gazowej (wentylacji minutowej płuc, poboru tlenu i wydalania dwutlenku węgla), utlenowania mięśni (SmO₂), całkowitej hemoglobiny (THb) i częstości skurczów serca (HR) oraz oznaczenia stężenia mleczanu we krwi (LA). Przeprowadzona analiza wyników potwierdziła praktyczną użyteczność pomiarów SmO₂ w ocenie odpowiedzi wysiłkowej organizmu na wysiłki o stałej intensywności, odpowiadające stanowi maksymalnej równowagi mleczanowej. Pomiary utlenowania mięśni podczas WAnT charakteryzowały się niską wartością w ocenie wydolności beztlenowej. Nie stwierdzono także istotnych różnic międzypłciowych w zakresie deoksygenacji ani tempa reoksygenacji mięśni podczas wysiłku maksymalnego i w fazie restytucji. W wysiłku maksymalnym wskaźniki utlenowania mięśni (SmO₂ Minimum i Δ SmO₂), jako lokalne parametry w obrębie mięśnia, nie są bezpośrednio związane z wielkością VO₂max ani z maksymalną mocą tlenową, co potwierdza brak istotnych korelacji z tymi zmiennymi, odzwierciedlającymi ogólnoustrojową, wysiłkową odpowiedź organizmu. Wyznaczenie wartości SmO₂ dla progów mleczanowych (AT₂, mDmax, AT₄ i LT) umożliwia stosowanie nieinwazyjnych

pomiarów SmO_2 (podobnie jak pomiarów HR) do fizjologicznej kontroli obciążeń w różnych programach treningowych. Podobnie potwierdzono, że możliwa jest implementacja zaleceń dotyczących intensywności wysiłku w oparciu o SmO_2 z normoksji do warunków hipoksji normobarycznej (ok. 3000 m n.p.m) u wysoko wytrenowanych zawodników SKIMO podczas submaksymalnego wysiłku wytrzymałościowego. Wyniki badań własnych wskazują ponadto na brak możliwości dokładnego szacowania stężenia mleczanu we krwi w oparciu o pomiary SmO_2 .

Słowa kluczowe: *spektroskopia w bliskiej podczerwieni, testy wydolności beztlenowej i tlenowej, progi mleczanowe, deoksygenacja i reoksygenacja mięśni, hipoksja normobaryczna*

Streszczenie w języku angielskim

Assessment of the usefulness of muscle oxygenation measurements for monitoring the exercise response in highly trained athletes and untrained individuals.

Over the past decade, portable measuring devices have been introduced into training practice; these utilise near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the degree of myoglobin oxygenation in muscle cytoplasm and haemoglobin oxygenation in the blood vessels of the muscle microcirculation (muscle oxygen saturation, SmO_2). NIRS measurements during exercise provide real-time information on local oxygen utilisation in working muscles, while during the post-exercise recovery period they allow the time taken for SmO_2 to return to resting levels to be assessed. Given the advantages of this new, non-invasive method in exercise diagnostics, this study aimed to evaluate the usefulness of muscle oxygenation measurements in determining the physiological response of the body in highly trained athletes and untrained individuals to various types of exercise tests. The study included a total of 79 participants (26 women and 53 men) with varying levels of fitness. Among the athletes studied, a substantial proportion were elite athletes representing the Polish National Team. The subjects performed the following tests: a submaximal test corresponding to the maximal lactate steady state (MLSS), a supramaximal test (Wingate test, WAnT) and a maximal test of graded intensity. Depending on the type of test, the following measurements were taken: gas exchange (minute ventilation, oxygen uptake and carbon dioxide output), muscle oxygenation (SmO_2), total haemoglobin (THb) and heart rate (HR), as well as blood lactate concentration (LA). Analysis of the results confirmed the practical utility of SmO_2 measurements in assessing the body's exercise response to constant-intensity exercise corresponding to the state of maximal lactate equilibrium. Measurements of muscle oxygenation during WAnT were characterised by low values in the assessment of anaerobic capacity. No significant gender differences were found in terms of muscle deoxygenation or the rate of muscle reoxygenation during maximal exercise and in the recovery phase. During maximal exercise, muscle oxygenation indices (SmO_2 Minimum and ΔSmO_2), as local parameters within the muscle, are not directly related to $\text{VO}_{2\text{max}}$ or maximal aerobic power, as confirmed by the absence of significant correlations with these variables, which reflect the body's systemic exercise response. Determining SmO_2 values corresponding to lactate thresholds (AT_2 , mDmax , AT_4 and LT) supports the application of non-invasive SmO_2 monitoring analogous to heart rate monitoring - for physiological control of training loads in various training programmes. Similarly, it has also been confirmed that it is possible to

implement exercise intensity recommendations based on SmO_2 from normoxia to normobaric hypoxia conditions (approx. 3000 m a.s.l.) in highly trained SKIMO athletes during submaximal endurance exercise. Furthermore, the present findings indicate that it is not possible to accurately estimate blood lactate concentration based on SmO_2 measurements.

Keywords: *near-infrared spectroscopy, anaerobic and aerobic exercise testing, lactate thresholds, muscle deoxygenation and reoxygenation, normobaric hypoxia*

1. Wstęp

Od wielu lat wskaźnikiem najczęściej stosowanym do oceny ogólnej wydolności fizycznej oraz stanu wytrenowania zawodników w sportach wytrzymałościowych jest maksymalny pobór tlenu (ang. *maximal oxygen uptake*, VO_2max). Współczesna mobilna technologia umożliwia pomiary poboru tlenu zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i terenowych. Jednak metody bezpośredniego wyznaczenia pułapu tlenowego związane są z kosztownym sprzętem pomiarowym jak i z udziałem wykwalifikowanego personelu do obsługi aparatury pomiarowej. Ponadto, wymagają one wysokiej motywacji badanego do wykonania wysiłku maksymalnego. Innymi wskaźnikami wykorzystywanymi do oceny wydolności fizycznej i monitorowania treningu są: stężenie mleczanu we krwi (ang. *lactate*, LA) oraz częstość skurczów serca (ang. *heart rate*, HR). Oznaczenia LA wymagają pobrania krwi włóścinkowej, co z uwagi na komfort zawodników wiąże się z ograniczoną częstotliwością pobrań. Natomiast powszechnie stosowane pomiary HR, oprócz niekwestionowanej przydatności przede wszystkim w dyscyplinach wytrzymałościowych, mają także pewne ograniczenia. Na przykład praktyka treningowa wykazała stosunkowo niską użyteczność pomiarów HR w kontroli treningów: interwałowego, siły mięśniowej, krótkich wysiłków supramaksymalnych, a także treningu w zróżnicowanym terenie, gdzie występują podbiegi i zbiegi (Born i in., 2017). Dodatkowo HR jest zależne od wielu czynników związanych ze stanem emocjonalnym, stopniem wypoczynku lub nawodnieniem badanej osoby czy też z warunkami otoczenia (temperatura i wilgotność, pora dnia, wysokość nad poziomem morza i inne).

W ciągu ostatnich kilkunastu lat do praktyki treningowej zostały wprowadzone mobilne urządzenia pomiarowe, które wykorzystują światło podczerwieni (ang. *near-infrared spectroscopy*, NIRS) do oceny stopnia utlenowania mioglobiny w cytoplazmie mięśni i hemoglobiny w naczyniach krwionośnych mikrokrażenia mięśniowego (ang. *muscle oxygen saturation*, SmO_2) (Perrey i Ferrari, 2018). Monitoring nasycenia mięśni tlenem dostarcza w czasie rzeczywistym informacji o jego wykorzystaniu podczas wysiłku. Jest to pomiar lokalny, którego poziom utlenowania mięśni w zadanym teście wysiłkowym zależy od lokalizacji monitora NIRS (Paquette i in., 2018). Pierwsze opracowania naukowe z wykorzystaniem NIRS u sportowców (wytrenowani wioślarze) opublikowano w 1992 roku (Chance i in., 1992). Dopiero wdrożenie przenośnych, bezprzewodowych mięśniowych oksymetrów w 2006 roku spowodowało szybki rozwój tej metody pomiarowej i nadal obserwuje się jej dalszy postęp (Biddulph i in., 2023; Farzam i in., 2018; Gandia-Soriano i

in., 2022). Ostatnio, podobne urządzenie wdrożyli do praktyki sportowej także polscy konstruktorzy, a oksymetr ich projektu jest dostępny na rynku.

Zdaniem wielu autorów pomiary z użyciem NIRS są prostym, bezpiecznym i szybkim sposobem umożliwiającym zarówno ocenę możliwości wysiłkowych w krótkotrwałych maksymalnych wysiłkach (Cettolo i in., 2007; Perrey, 2022b), jak i wyznaczanie tzw. stref intensywności treningowej (Borges i Driller, 2016; Crum i in., 2017; Driller i in., 2016; Driller i in., 2016). Dodatkowo współczesne oksymetry dały możliwość prowadzenia pomiarów podczas wysiłków startowych w różnych dyscyplinach sportu np. u łyżwiarzy szybkich (Hettinga i in., 2016), kanadyjkarzy czy kajakarzy (Paquette i in., 2018) oraz wioślarzy (Mehmet Topal i in., 2023).

Urządzenia do pomiaru utlenowania mięśni posiadają wbudowaną pamięć umożliwiającą rejestrację treningu. Ponadto takie ich cechy jak nieinwazyjność pomiaru, łączność bezprzewodowa z rejestratorami HR, smartfonami czy komputerami przenośnymi, niewielkie rozmiary i wodoszczelność, wysoka częstotliwość próbkowania oraz przystępna cena sprawiają, że trenerzy chętnie wdrażają je do praktyki treningowej. Podczas gdy odpowiedź HR i poboru tlenu na zadaną intensywność wysiłku jest opóźniona, to Index Saturacji Tkanek (ang. *tissue oxygenation index* - TOI) daje szybszą informację zwrotną (ang. *rapid feedback*) o reakcji mięśni na aktualne obciążenie treningowe (Born i in., 2017). Szczególnie interesujące są ostatnie wyniki badań Paquette i in. (2018), w których autorzy wykazali, że u kanadyjkarzy i kajakarzy monitorowanie utlenowania mięśni, było istotne jako wyznacznik zdolności startowej. Warto dodać, że pomiary SmO₂ mogą być pomocne do określania obciążeń treningowych (m. in. intensywności wysiłku, tempa wypoczynku jak i czasu trwania treningu) u kajakarzy (Paquette i in., 2020), łyżwiarzy szybkich (Hettinga i in., 2016), pływaków (Dalamatros i in., 2021; Jones i in., 2018), kolarzy (Jones i in., 2015; Neary i in., 2002), wspinaczy sportowych (Dindorf i in., 2023; Kodejska i in., 2016), a także u triathlonistów (Olcina i in., 2019). Z uwagi na dużą wartość diagnostyczną pomiarów utlenowania mięśni w wyżej wymienionych badaniach, istnieje potrzeba oceny przydatności pomiarów utlenowania mięśni do monitorowania obciążeń treningowych w innych dyscyplinach sportowych.

1.1. Urządzenia NIRS

Technologia NIRS, oparta na spektroskopii w bliskiej podczerwieni dostarcza w sposób nieinwazyjny informacji o zmianach w utlenowaniu i hemodynamice w tkance

mięśniowej (Boushel i in., 2001; Ferrari i in., 2011; Stöcker i in., 2016). Sygnały NIRS są wynikiem średniej ważonej nasycen tlenem hemoglobiny (ang. *haemoglobin*, Hb) w naczyniach krwionośnych (małe tętnice, tętniczki, naczynia włosowate, żyły, małe żyły) oraz mioglobiny (ang. *myoglobin*, Mb) we włóknach mięśniowych (Grassi i Quaresima, 2016; McCully i Hamaoka, 2000). Podkreślić należy, że wpływ na sygnał NIRS ma grubość podskórnej tkanki tłuszczowej (ang. *adipose tissue thickness* - ATT). Wykazano, że 5 mm grubość zmniejsza penetrację światła podczerwieni o ok. 20% (Cayot i in., 2021; Van Der Zwaard i in., 2016), dlatego algorytmy w urządzeniach NIRS skonstruowane są w taki sposób, aby wyeliminować ten czynnik (Hamaoka i in., 2011). Urządzenia wykorzystujące technologię NIRS monitorują różne wskaźniki, lecz w badaniach sportowców głównie zwraca się uwagę na utlenowanie tkanek mięśniowych (SmO_2) oraz hemoglobinę całkowitą (ang. *total haemoglobin*, THb). Wskaźnik SmO_2 jako stosunek utlenowanej hemoglobiny (ang. *oxyhaemoglobin*, HbO_2) i mioglobiny (ang. *oxymyoglobin*, MbO_2) do hemoglobiny całkowitej, odzwierciedla zmiany w dostarczaniu i zużywaniu tlenu w mięśniach. Natomiast wskaźnik wartości THb, który nie jest związany z intensywnością wysiłku, służy ocenie lokalnej objętości krwi (Pereira i in., 2007).

Należy podkreślić, że charakterystyka zmian parametrów NIRS odzwierciedla zmiany mikronaczyniowe w mięśniach, a analiza wskaźników określonych z wykorzystaniem spektroskopii w bliskiej podczerwieni wraz z innymi wskaźnikami krążeniowo-oddechowymi pozwala na lepsze zrozumienie mechanizmu transportu tlenu w trakcie wysiłku. Nie mniej, wciąż prowadzone są badania nad znormalizowanym wskaźnikiem, który pozwalałby na pełną ocenę dostarczania i wykorzystania tlenu w mięśniach (Keir i in., 2022; Stöcker i in., 2017).

1.2. Zastosowanie technologii NIRS do pomiaru utlenowania mięśni w sporcie

Pomiar utlenowania tkanki mięśniowej dostarcza informacji o transporcie i wykorzystaniu tlenu w mięśniach (McCully i Hamaoka, 2000). Czas, w którym wskaźnik utlenowania mięśni wraca do wartości spoczynkowych, odzwierciedla dynamiczną równowagę pomiędzy dostarczaniem a zużywaniem tlenu. Wydłużanie się czasu potrzebnego do restytucji wskaźnika utlenowania mięśni do wartości spoczynkowych oznacza deficyt tlenu, zwłaszcza w przypadku wysiłków o wysokiej intensywności (Hamaoka, 2013). Należy jednak pamiętać, że jest to pomiar miejscowy, ponieważ wyniki

badan wykazały znaczne różnice w utlenowaniu mięśni podczas tego samego wysiłku testowego w zależności od lokalizacji monitora NIRS (Paquette i in. 2018).

Pierwsza praca przeglądowa o zastosowaniu technologii NIRS do pomiaru utlenowania mięśni w sporcie dotyczyła następujących dyscyplin: narciarstwo alpejskie, biegi przełajowe, wioślarstwo, podnoszenie ciężarów, kolarstwo i łyżwiarstwo szybkie (Quaresima i in., 2003). Tematykę wykorzystania spektroskopii w bliskiej podczerwieni w monitorowaniu obciążeń treningowych i w projektowaniu planów treningowych w dyscyplinach wytrzymałościowych podjął Neary (2004), natomiast m.in. w judo, piłce nożnej i żeglarskim przedstawili Perrey i Ferrari (2018). W ostatniej przytoczonej pracy przeglądowej tylko 6 z 57 cytowanych badań zostało opublikowanych przed 2007 rokiem, co wskazuje, że badanie utlenowania mięśni przy pomocy NIRS jest stosunkowo nowym zagadnieniem.

Pomiary w technologii NIRS dostarczają istotnych informacji trenerom i zawodnikom o reakcji mięśni na wysiłek jak i ich regeneracji oraz dodatkowo jest to metoda nieinwazyjna, a sprzęt jest lekki, przenośny, wodoszczelny i odpowiedni do treningów w terenie. Odczyty z monitora zegarka umieszczonego np. na nadgarstku umożliwiają na bieżąco śledzenie zmian utlenowania mięśni. To pozwala na ocenę intensywności wykonywanych ćwiczeń i jest pomocne podczas treningu biegowego czy na pływalni (Born i in., 2017; Dalamitros i in., 2021; Paquette i in., 2019). Pomiar przepływu krwi i utlenowania tkanki mięśniowej umożliwia dostosowanie czasu przerw lub czasu trwania poszczególnych wysiłków w trakcie treningu (Feldmann i in., 2020; Frikha i in., 2016). Technologia NIRS zatem może być z powodzeniem wykorzystywana w treningu wytrzymałościowym jak i krótkotrwałych wysiłkach o wysokiej intensywności oraz w treningu siły mięśniowej. Jest to możliwe, ponieważ jakość odbieranego sygnału jest dobra, nawet podczas wykonywania dynamicznych wysiłków. Wykazano, że w warunkach terenowych SmO_2 jest bardziej precyzyjnym wskaźnikiem zapotrzebowania metabolicznego mięśnia niż HR (Born i in. 2017).

Na końcowy wynik sportowy ma wpływ wiele zmiennych, niektóre z nich można modyfikować w trakcie treningu poprzez intensywność wykonywanych ćwiczeń (procent obciążenia maksymalnego) czy ilość powtórzeń i serii. Za szczególnie pomocne należy uznać pomiary utlenowania mięśni do ustalania czasu restytucji pomiędzy wysiłkami, zwłaszcza w treningu siły mięśniowej (Pereira i in., 2007). Podczas kilkusekundowych

wysiłków, w tego rodzaju treningu, klasyczne pomiary takie jak np. HR czy stężenie LA cechują się ograniczoną przydatnością. W tym zakresie pomocne są pomiary utlenowania mięśni, które są czułe na zmiany metaboliczne w pracującym mięśniu nawet podczas supramaksymalnych wysiłków (Miranda-Fuentes i in., 2021). Zastosowanie oksymetrów pozwoli zatem ustalić optymalne obciążenie nawet w tego rodzaju treningu, w tym liczbę powtórzeń czy serii jak i czas przerwy wypoczynkowej (Gómez-Carmona i in., 2020).

1.3. Kierunki rozwoju badań z zastosowaniem technologii NIRS

Według Ferrari i in. (2011) pomiary SmO_2 i THb mogłyby być w przyszłości wykorzystywane nie tylko w procesie treningowym, ale i w rehabilitacji. W piśmiennictwie są opisane również badania dotyczące zastosowania technologii NIRS jako narzędzia monitorującego terapię u pacjentów z chorobami kardiologicznymi (Hamaoka, 2013). Analiza utlenowania mięśni może być też pomocna do diagnostyki choroby związanej z utrudnionym przepływem krwi przez tętnicę biodrową, częściej u kolarzy (van Hooff i in., 2022). Stosowanie oksymetrów wraz z pomiarami wskaźników oddechowych, EKG, EMG itp. może dać pełniejszy obraz zmian zachodzących w trakcie wysiłku fizycznego, szczególnie u osób z chorobami układu krążenia (Hamaoka i McCully, 2019).

Najnowsze prace wykazują dobrą przydatność pomiarów NIRS/fNIRS do oceny funkcjonowania mózgu u zawodników różnych dyscyplin sportowych (Perrey, 2022a). Aktywność mózgu określana przy pomocy światła podczerwieni może być wykorzystywana jako wskaźnik obciążenia wewnętrznego oceniającego zmęczenie i stres (Herold i in., 2020) oraz wyznacznik czasu przerw podczas aktywności fizycznej (Tiberini i in., 2021). Pomiary tego typu mogą być użyteczne u osób poddawanych dużym przeciążeniom, miarą których jest nawet wielokrotność przyspieszenia ziemskiego (Formuła 1, piloci akrobacji lotniczej). Pomiary NIRS pomocne są także w dyscyplinach gdzie istnieje wysokie ryzyko wstrząśnienia mózgu (boks, snowboard, rugby) lub w warunkach hipoksji (narcciarstwo wysokogórskie, sporty zimowe) (Champigneulle i in., 2022; Churchill i in., 2017; Tiberini i in., 2021). Regularny wysiłek sportowy zwiększa wprawdzie aktywność mózgu (Perrey, 2013), jednak coraz popularniejsze długotrwałe wysiłki (ironman, ultramaraton) i towarzyszące im często przetrenowanie, mogą wpływać negatywnie na funkcjonowanie mózgu (Blain i in., 2019), co potwierdza zasadność prowadzenia tego typu badań.

Dużą zaletę stanowi możliwość pomiarów SmO_2 w warunkach naturalnych np. na wodzie u kajakarzy i wioślarzy czy też torze łyżwiarskim lub na trasie biegowej i kolarskiej

(Borges i Driller, 2016; Hesford i in., 2013; Paquette i in., 2020; Spencer i in., 2012). Daje to możliwości oceny odpowiedzi organizmu zawodnika na stosowany wysiłek startowy. Z kolei analiza zapisu utlenowania mięśni podczas wysiłków stopniowanych może być pomocna przy ustalaniu stref intensywności wysiłku w obciążeniach treningowych (Cayot i in., 2021; Feldmann A. i in., 2022; Keir i in., 2022; Rodrigo-Carranza i in., 2021).

Badacze wskazują na potrzebę dalszego rozwoju technologii NIRS, w tym także zaprojektowania odzieży sportowej wyposażonej w zminiaturyzowane oksymetry zasilane promieniowaniem słonecznym, które tworzyłyby mapę utlenowania różnych mięśni w trakcie wysiłku. To mogłoby ułatwić ocenę aktywności pracujących mięśni lub analizę ekonomii wykonywanego wysiłku w trakcie treningów (Hamaoka i in., 2011; Hamaoka i McCully, 2019; Perrey i Ferrari, 2018).

Kolejnym aspektem jest wykorzystanie technologii NIRS w warunkach hipoksji (Perrey i in., 2024). Hipoksja to stan, w którym utlenowanie organizmu lub wybranych tkanek jest niedostateczne. Jedną z naturalnych przyczyn niedotlenienia jest przebywanie na dużych wysokościach, gdzie ciśnienie atmosferyczne jest niższe i obniża się ciśnienie parcjale tlenu we krwi (hipoksja hipobaryczna). Stan hipoksji można również uzyskać poprzez obniżenie zawartości tlenu w powietrzu, co również obniża ciśnienie parcjale tlenu we krwi, przy zachowaniu ciśnienia atmosferycznego (hipoksja normobaryczna) (Duc i in., 2011; Faiss i in., 2014). Strefy treningowe określane często na podstawie HR i LA w laboratorium w normoksji, często muszą uwzględniać korektę wartości tych wskaźników dostosowując ich odpowiedź do warunków wysokogórskich. Wprawdzie w piśmiennictwie dostępne są prace dotyczące kinetyki zmian SmO_2 w zmiennych warunkach wysokościowych (Bourdillon i in., 2009; Horiuchi i in., 2022; Rodriguez i in., 2019; Rupp i in., 2019), lecz zaledwie kilka porównuje utlenowanie mięśni podczas wysiłku w normoksji i hipoksji. Co ciekawe, autorzy tych badań sugerowali podobną reakcję utlenowania mięśni na wysiłki interwałowe i o wzrastającej intensywności, niezależnie od wysokości nad poziom morza (Albertus-Cámara i in., 2024; Solsona i in., 2022; Subudhi i in., 2007). Sugeruje to, że pomiary utlenowania mięśni mogą być stabilnym wskaźnikiem wykorzystywanym do optymalizacji treningu w różnych warunkach wysokościowych. Naturalna hipoksja jest często wykorzystywana jako skuteczny czynnik wpływający na poprawę wydolności fizycznej w różnych dyscyplinach sportowych, szczególnie o charakterze wytrzymałościowym. Jednak istotna jest tutaj ocena czasu uzyskania pełnej

aklimatyzacji do określonej wysokości, co powoduje trudność w realizacji treningu w pierwszych dniach pobytu na wysokości.

1.4. Uzasadnienie prowadzonych badań

W ostatnich latach podejmowano próby wyznaczenia progu beztlenowego w sposób nieinwazyjny, wykorzystując m.in. wskaźnik SmO_2 (Cayot i in., 2021; Driller i in., 2016; Farzam i in., 2018; McMorries i in., 2019; Raleigh i in., 2018; G. Xu i in., 2011). Potwierdzono wysoką zgodność pomiędzy wyznaczonym SmO_{2AT} progiem (ang. *muscle oxygenation breakpoint*) a progiem wyznaczonym w oparciu o stężenie mleczanu we krwi w badaniach biegaczy długodystansowych i triathlonistów (Snyder i Parmenter, 2009), kolarzy (Driller i in., 2016) i biegaczy (Born i in., 2017).

Wykazano wysoką zgodność wartości progu beztlenowego wyznaczonego z pomiarów SmO_2 i LA u osób trenujących rekreacyjnie, przy niskich obciążeniach wysiłkowych, będących często poniżej wartości progowych u sportowców (McMorries i in., 2019). Różnice w wielkości progu w wymienionych grupach uzasadniają potrzebę oszacowania i porównania intensywności progowej również na podstawie zmian utlenowania pracujących mięśni w grupie wysoko wytrenowanych sportowców i osób nietrenujących (studentów).

Podkreślenia wymaga fakt, że algorytmy wyznaczania progu beztlenowego w oparciu o przebieg zmian SmO_2 często są złożone (McManus i in., 2018), lub nie są w ogóle ujawniane przez producentów urządzeń NIRS (Farzam i in., 2018). Z uwagi na łatwość wyznaczenia i praktyczną przydatność progów beztlenowych wyznaczanych w oparciu o stężenie mleczanu we krwi (Jamnick i in., 2018; Sanders i in., 2020), w pracy własnej uznano za celowe zastosowanie tej metody dla wyznaczenia progu beztlenowego dla utlenowania mięśni (SmO_{2AT}). Analogicznie wyznacza się np. wartości progowe HR (HR_{AT}) na potrzeby treningu wytrzymałości. W dostępnym piśmiennictwie nie napotkano prac podejmujących tematykę porównania SmO_{2AT} w reprezentatywnych grupach wysoko wytrenowanych sportowców i zdrowych, nietrenujących osób. Porównanie wyników tak różnych grup umożliwi zobrazowanie różnic w odpowiedzi wysiłkowej SmO_{2AT} w zależności od poziomu wytrenowania. Ponadto w piśmiennictwie poświęconym wykorzystaniu technologii NIRS niewiele jest prac prowadzonych z udziałem elity zawodników z różnych dyscyplin sportowych i podejmujących tematykę różnic międzypłciowych. To sprawiło, że w badaniach własnych za szczególnie wartościowe uznano udział wybitnych sportowców z

różnych dyscyplin sportowych. Wyniki uzyskiwane u najlepszych zawodników mogą stanowić istotny punkt odniesienia dla trenerów jak i dostarczyć cennych informacji dla badaczy.

W praktyce treningowej w oparciu o wskaźniki z testu wysiłkowego o stopniowanym obciążeniu często wyznacza się strefy intensywności treningowej, które są szczególnie przydatne w ocenie intensywności wysiłku i doborze obciążeń wysiłkowych (Crum i in., 2017; Feldmann i in., 2022; Perrey, 2022b; Raleigh i in., 2018; Vasquez-Bonilla i in., 2022; Wang i in., 2012). W treningu wytrzymałości stosuje się na przykład submaksymalne obciążenia o stałej intensywności, weryfikowane często przez kryteria uzyskania stanu maksymalnej równowagi mleczanowej (ang. *maximal lactate steady state*, *MLSS*). Z praktycznego punktu widzenia dla trenerów i zawodników, istotnym jest zatem czy mięśniowe monitory tlenu (ang. *muscle oxygen monitor*) wykorzystujące NIRS umożliwiają skuteczny i precyzyjny dobór obciążenia wysiłkowego dla intensywnego treningu tlenowego zbliżonego do *MLSS*. Z dotychczasowych badań wynika, że możliwe jest dokładne określenie stanu *MLSS* u zdrowych osób na podstawie pomiaru NIRS (Keir i in., 2015). Z kolei Snyder i Parmenter (2009) wykazali, że próg beztlenowy ($\text{SmO}_{2\text{AT}}$) umożliwia poprawne wyznaczenie prędkości biegu dla 30 min wysiłku na poziomie *MLSS*. Ponadto w praktyce treningowej wioślarzy obciążenie na poziomie *MLSS* stanowi jedno z podstawowych kryteriów doboru intensywności do treningu wytrzymałości, dlatego za celowe uznano próbę weryfikacji *MLSS* za pomocą pomiarów SmO_2 i THb w tej dyscyplinie sportu.

W dyscyplinach wytrzymałościowych powszechnie wykorzystywany jest trening wysokogórski. Dobór obciążeń treningowych, szczególnie w początkowej fazie adaptacji do zmiennych warunków wysokościowych jest utrudniony ze względu na zróżnicowaną reakcję układu krążenia (HR) oraz LA. Wykazano, że SmO_2 podczas krótkotrwałych sprintów w różnych warunkach hipoksji normobarycznej pozostawało stabilne i in., 2022; Solsona i in., 2022), nie ma natomiast badań porównujących odpowiedzi SmO_2 podczas dłuższych wysiłków. Monitorowanie intensywności wysiłku w oparciu o HR bywa w tym okresie mało precyzyjne, ze względu na podwyższoną odpowiedź podczas wysiłków submaksymalnych. Podobne ograniczenia dotyczą interpretacji LA (Lasshofer i in., 2021). Ciekawe zatem wydaje się uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy tzw. monitory tlenu mogą stanowić „złoty standard” w doborze intensywności wysiłku na wysokości, co wpłynęło na podjęcie badań własnych porównujących reakcję fizjologiczną organizmu (SmO_2 , LA i HR)

w warunkach normoksji i hipoksji normobarycznej. W związku z tym podjęto próbę oceny zasadności przeniesienia wyznaczonych stref treningowych w warunkach normoksji, na warunki hipoksji, co jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia praktyki treningowej.

Wyżej opisane rosnące zainteresowanie technologią NIRS w badaniach z zakresu fizjologii wysiłku fizycznego uzasadnia potrzebę prowadzenia dalszych badań z wykorzystaniem nieinwazyjnych pomiarów utlenowania mięśni. Szczególnie istotne wydaje się podjęcie tego tematu u wysoko wytrenowanych zawodników, gdzie precyzyjne dozowanie obciążenia wysiłkowego stanowi o efektywności treningu.

2. Cel pracy i pytania badawcze

W publikacjach własnych zaprezentowanych w koncepcji rozprawy doktorskiej, podjęto próbę poszerzenia obecnego stanu wiedzy z zakresu metabolizmu wysiłkowego i wykorzystania tej wiedzy w praktyce treningowej u wysoko wytrenowanych zawodników różnych dyscyplin sportowych oraz osób nietrenujących.

Celem głównym badań była ocena użyteczności pomiarów utlenowania mięśni (SmO_2) do określania fizjologicznej odpowiedzi organizmu wysoko wytrenowanych zawodników i osób nietrenujących na wysiłki testowe. Ocenie poddana została deoksygenacja mięśni (wysiłkowe obniżenie SmO_2), reoksygenacja mięśni (tempo restytucji SmO_2) w wysiłkach submaksymalnych, maksymalnych i supramaksymalnych oraz wysiłkowe zmiany całkowitej hemoglobiny (THb) w wysiłku submaksymalnym (MLSS). Ponadto zweryfikowano możliwości przenoszenia wyznaczonych stref intensywności wysiłku pomiędzy warunkami normoksji i hipoksji w oparciu o SmO_2 .

Pytania badawcze

1. Jaka jest użyteczność pomiarów utlenowania mięśni (SmO_2 i całkowitej hemoglobiny THb) w ocenie reakcji fizjologicznych na submaksymalne wysiłki o stałej intensywności? (Publikacja 1)
2. Czy i jakie zależności występują pomiędzy utlenowaniem mięśni a wynikami osiąganymi w teście wydolności beztlenowej Wingate? (Publikacja 2)
3. Czy zachodzą różnice w deoksygenacji i reoksygenacji mięśni w odpowiedzi wysiłkowej na test o stopniowanej intensywności w zależności od płci (Publikacja 2) i poziomu wytrenowania? (Publikacja 3)
4. Czy i jakie zależności występują pomiędzy SmO_2 a pozostałymi wskaźnikami wysiłkowymi w teście o stopniowanej intensywności? (Publikacja 2 i 3)
5. Jaka jest praktyczna przydatność wyznaczonych wartości progowych utlenowania mięśni? (Publikacja 3 i 4)
6. Czy intensywność wysiłku u zawodników narciarstwa wysokogórskiego, wyznaczona w oparciu o SmO_2 w warunkach normoksji jest użyteczna w doborze tlenowych obciążeń treningowych (odpowiadających MLSS) w warunkach hipoksji normobarycznej? (Publikacja 4)

7. Czy szacowanie stężenia mleczanu we krwi podczas stopniowanych wysiłków w oparciu o nieinwazyjne pomiary utlenowania mięśni wykazuje dostateczną przydatność dla praktyki treningowej? (Dane niepublikowane)

3. Materiał i metody badań

3.1. Charakterystyka badanych grup

Badania przeprowadzono po uzyskaniu zgody Komisji Etyki Badań Naukowych Instytutu Sportu – Państwowego Instytutu Badawczego (nr. KEBN-22-71-KR i KEBN-24-97-KR). Badaniami objęto łącznie 79 osób (26 kobiet i 56 mężczyzn) o zróżnicowanym stopniu wytrenowania (publikacje 1-4). W badaniach uczestniczyły zawodniczki i zawodnicy w kategoriach od juniora do seniora, reprezentujący różne dyscypliny sportowe, zarówno o charakterze wytrzymałościowym (wioślarstwo, łyżwiarstwo szybkie, narciarstwo wysokogórskie), jak i szybkościowym (łyżwiarstwo short-track), a także zdrowi, nietreningujący studenci AWF. Wśród badanych liczną grupę stanowili czołowi sportowcy (elita) z wymienionych dyscyplin sportowych, należący do Kadry Narodowej Polski. Przed przystąpieniem do badań każdy uczestnik został poinformowany o celach i metodach badań, wyraził pisemną zgodę na udział w nich oraz został dopuszczony do wykonywania maksymalnego wysiłku przez lekarza.

Podczas badań temperatura otoczenia wahała się od 18 do 22°C. Wszyscy uczestnicy wykonywali testy wysiłkowe o stałej porze dnia, między godziną 10.00 a 16.00. Badanych poinformowano, aby nie wykonywali intensywnych treningów w dniu poprzedzającym badanie, a ostatni posiłek spożyli co najmniej 2 godziny przed testem wysiłkowym.

3.2. Metody badań

3.2.1. Rodzaje testów wysiłkowych

W badaniach wykorzystano następujące testy wysiłkowe:

- o stałej, submaksymalnej intensywności, tzw. test stanu maksymalnej równowagi mleczanowej (MLSS) na ergometrze wioślarskim i bieżni mechanicznej,
- o stopniowanej intensywności na ergometrze wioślarskim, rowerowym lub bieżni mechanicznej, maksymalny, wykonywany do odmowy,
- Wingate, supramaksymalny test wydolności beztlenowej na kończyny dolne (WAnT, ang. *Wingate Anaerobic Test*).

W zależności od rodzaju testu, wykonano pomiary: wymiany gazowej (wentylacji minutowej płuc, poboru tlenu i wydalenia dwutlenku węgla), utlenowania mięśni (SmO_2), całkowitej hemoglobiny (THb) i częstości skurczów serca (HR) oraz oznaczenia stężenia mleczanu we krwi (LA).

Test submaksymalny o stałej intensywności (MLSS)

Czołówka wioślarzy wykonała submaksymalny test na ergometrze wioślarskim typu Concept 2 (Morrisville, USA) ze stałą mocą i indywidualnym, stałym tempem wiosłowania, opisany przez Klusiewicza (2005). Wysiłek ten został podzielony na trzy odcinki 10 minutowe (łącznie 30 minut), po których następowała 1 minutowa przerwa na pobranie krwi włósniczkowej. Test poprzedzony był 5 minutową rozgrzewką z intensywnością odpowiadającą HR 130 sk/min. Przerwa między rozgrzewką a zasadniczym obciążeniem wysiłkowym wynosiła 2 minuty. Jako obciążenie wysiłkowe MLSS przyjęto moc odpowiadającą $84 \pm 1\%$ progu beztlenowego (AT_4) (Publikacja nr 1).

Narciarze wysokogórscy wykonali także submaksymalny test MLSS, lecz na bieżni mechanicznej (HP Cosmos Sports & Medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Niemcy). Każdemu z zawodników wyznaczono na podstawie stopniowanego testu maksymalnego na bieżni mechanicznej indywidualne, progowe utlenowania mięśni (SmO_2) w normoksji. Następnie w warunkach hipoksji (3000 m n.p.m.) dobierana była prędkość i kąt nachylenia bieżni podczas testu MLSS, tak aby intensywność wysiłku wynosiła 90–105% SmO_2 z progu AnT z normoksji (Publikacja nr 4).

MLSS zdefiniowano za Heckiem i in. (1985), jako najwyższe stężenie mleczanu we krwi, które nie wzrasta powyżej 1,0 mmol/l, w czasie ostatnich 20 minut wysiłku o stałej mocy. Opisany test jest często realizowany w praktyce treningowej przez polskich zawodników na różnych stopniach zaawansowania sportowego jako obciążenie odpowiadające intensywnemu treningowi tlenowemu w stanie względnej równowagi między produkcją a utylizacją mleczanu we krwi.

Testy maksymalne o stopniowanej intensywności

Wioślarze wykonali test wysiłkowy na ergometrze wioślarskim typu Concept 2 (Morrisville, USA) w wersji „do odmowy”. Test ten jest rutynowo stosowany przez polskich wioślarzy i polega na wykonaniu stopniowanych obciążeń o czasie trwania 3 minut przedzielonych 30 sekundową przerwą na pobranie krwi włósniczkowej (Klusiewicz i in., 2014) (Publikacja nr 1).

W badaniach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich oraz studentów AWF zastosowano test stopniowany o wzrastającej intensywności (*ang. graded exercise test, GXT*) bez przerw wypoczynkowych, wykonywany do odmowy na cykloergometrze Cyclus 2 (RBM

elektronik-automation GmbH, Niemcy). Test rozpoczynano od mocy wynoszącej 30–70 W i w kolejnych 3 minutowych wysiłkach obciążenie zwiększano o 30–50 W. Wielkość początkowego obciążenia oraz przyrost mocy były indywidualnie dostosowywane do płci, masy ciała oraz poziomu wytrenowania uczestników, tak aby uzyskać możliwie zbliżony całkowity czas trwania próby dla wszystkich badanych (około 17–18 minut). Badani zostali poinstruowani, aby kontynuować wysiłek do momentu całkowitego wyczerpania, definiowanego jako niemożność utrzymania wymaganej mocy pomimo werbalnej motywacji. Po zakończeniu testu uczestnicy wykonywali przez 3 minuty wysiłek o niskiej intensywności (0,5 W/kg masy ciała) w ramach aktywnego schłodzenia. Celem tej fazy było stopniowe obniżenie obciążenia układu sercowo-naczyniowego oraz zapobieganie wystąpieniu reakcji ortostatycznej (Publikacja nr 3).

U narciarzy wysokogórskich wykonano test stopniowany o wzrastającej intensywności na bieżni mechanicznej HP Cosmos Saturn (HP cosmos sports & medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Niemcy) w warunkach normoksji (87 m n.p.m., $FiO_2 = 20,8\%$). Każdy etap trwał 4 minuty, przedzielony 1 minutową przerwą na pobranie krwi włóśniczkowej. Prędkość początkowa była dobrana indywidualnie dla każdego zawodnika (8-10 km/h) i wzrastała co 2 km/h, ze stałym nachyleniem kąta bieżni (1,5%) (Publikacja 4).

Opisane testy stopniowane umożliwiły pomiar VO_{2max} , a także wyznaczenie progu tlenowego dla stężenia mleczanu we krwi 2 mmol/l (AT_2) oraz beztlenowego dla stężenia mleczanu 4 mmol/l (AT_4) i progów indywidualnych: zmodyfikowany D_{max} (mD_{max}) i próg mleczanowy (LT).

Test supramaksymalny wydolności beztlenowej

W badaniach łyżwiarzy szybkich zastosowano test Wingate na cykloergometrze Monark 874E (Monark Exercise AB, Szwecja), który poprzedzała standardowa 5 minutowa rozgrzewka. Przerwa między testem a rozgrzewką wynosiła minimum 2 minuty wypoczynku, po której łyżwiarki i łyżwiarze szybcy wykonywali 30 sekundowy wysiłek na cykloergometrze z obciążeniem dobranym indywidualnie do masy ciała (7,5% masy ciała). Zadaniem badanych było uzyskanie po komendzie „START” jak największej częstości pedałowania i utrzymywanie jej do końca testu. Za pomocą sprzężonego z cykloergometrem programu komputerowego (MCE 5.1 – JBA Z. Staniak) wyliczone zostały podstawowe parametry mechaniczne wysiłku, tj. wykonana praca i uzyskana moc maksymalna (Obmiński i in., 2016) (Publikacja nr 2).

3.2.2. Pomiary wykonywane podczas badań

Pomiary antropometryczne

Wysokość ciała została zmierzona za pomocą antropometru. Masa ciała i komponenty ciała badanych (zawartość tkanki tłuszczowej i beztłuszczowej masy ciała) zostały określone metodą elektrycznej bioimpedancji (BIA) przy użyciu analizatora model BC-420 MA firmy Tanita (Japonia).

Pomiary wymiany gazowej

Podczas stopniowanych, maksymalnych, testów wysiłkowych w sposób ciągły rejestrowane były wskaźniki wymiany gazowej (wentylacja minutowa płuc, pobór tlenu i wydalenie dwutlenku węgla) metodą oddech za oddech (BxB) ergospirometrem MetaMax 3B lub MetaLyzor 3B firmy Cortex (Cortex Biophysik GmbH, Niemcy) oraz częstość skurczów serca (HR). Wcześniejsze badania (Macfarlane i Wong, 2012) potwierdziły, że zastosowany system pomiarowy jest niezawodny i dokładny w zakresie pomiaru poboru tlenu. Przed każdym testem wykonano kalibrację przepływu za pomocą 3-litrowej pompy (5530 series, Hans Rudolph, Inc., MO, USA) oraz jednopunktową kalibrację gazową względem powietrza atmosferycznego. Okresowo, zgodnie z zaleceniem producenta urządzenia wykonywano także dwupunktową kalibrację mieszkanką gazową o znanym składzie (15% O₂, 5% CO₂, reszta N₂).

Maksymalny pobór tlenu (pułap tlenowy, VO₂max) zdefiniowano jako najwyższą średnią wartość poboru tlenu uzyskaną w 30-sekundowym przedziale pomiarowym podczas testu wysiłkowego. Jako kryteria osiągnięcia VO₂max przyjęto: plateau VO₂ pomimo wzrostu obciążenia, stężenie mleczanu we krwi po wysiłku >8 mmol/l, wskaźnik wymiany gazowej (RER) >1,1 oraz osiągnięcie skorygowanej wiekowo maksymalnej częstości skurczów serca wyrażonej wzorem: HRmax = 220 - wiek zawodnika. Jeżeli podczas testu spełnione zostały co najmniej dwa z powyższych kryteriów, osiągnięty wysiłek i pobór tlenu uznano za maksymalne.

Oznaczenia stężenia mleczanu we krwi (LA) i pomiary częstości skurczów serca (HR)

W zastosowanych testach, zależnie od rodzaju wysiłku, pobierano krew z płatka ucha lub opuszki palca w spoczynku, bezpośrednio po każdym wysiłku oraz w 3 minucie po zakończeniu testu w celu oznaczenia stężenia mleczanu (LA) aparatem Super GL 2 (Dr

Müller, Niemcy). Częstość skurczów serca rejestrowano w sposób ciągły w teście submaksymalnym i testach maksymalnych przy użyciu systemu Cortex wykorzystującego nadajniki Polar Electro Oy, Finlandia.

Pomiary utlenowania mięśni (SmO₂) i całkowitej hemoglobiny (THb)

Podczas testów wysiłkowych Monitory NIRS (Moxy monitors; Fortiori Design LLC, Hutchinson, MN, USA) umieszczano na aktywnym mięśniu, to jest na bocznej części brzucha mięśnia obszernego bocznego, Fotografia 1. (10-15 cm powyżej proksymalnej granicy rzepki). Monitory zostały ustabilizowane i zabezpieczone samoprzylepnym plastrem po wcześniejszym usunięciu owłosienia i odtłuszczeniu skóry. Dodatkowo u studentów przeprowadzono pomiar grubości fałdu skórno-tłuszczowego w miejscu, w którym umieszczono monitor Moxy. Tego pomiaru nie wykonywano u łyżwiarzy szybkich, ponieważ wartości wskaźnika BMI (kobiety $21,3 \pm 1,0$ i mężczyźni $22,3 \pm 1,2$ kg/m²) były w zakresie przyjętych norm.



Fotografia 1. Sposób stabilizacji monitora Moxy na mięśniu obszernym bocznym.

Monitor Moxy jest monitorem spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS). Wykorzystuje nowy typ algorytmu opartego na modelowaniu metodą Monte Carlo, uwzględniający wpływ nieznanej grubości tkanki tłuszczowej. System wykorzystuje cztery długości fal: 680, 720, 760 i 800 nm, oraz dwa odstępów między emiterami a detektorem: 12,5 i 25 mm. Podczas spoczynku, wysiłku jak i restytucji rejestrowano utlenowanie mięśnia (SmO₂) i całkowitą hemoglobinę (THb). Pomiary utlenowania mięśnia z 2 sekundowych

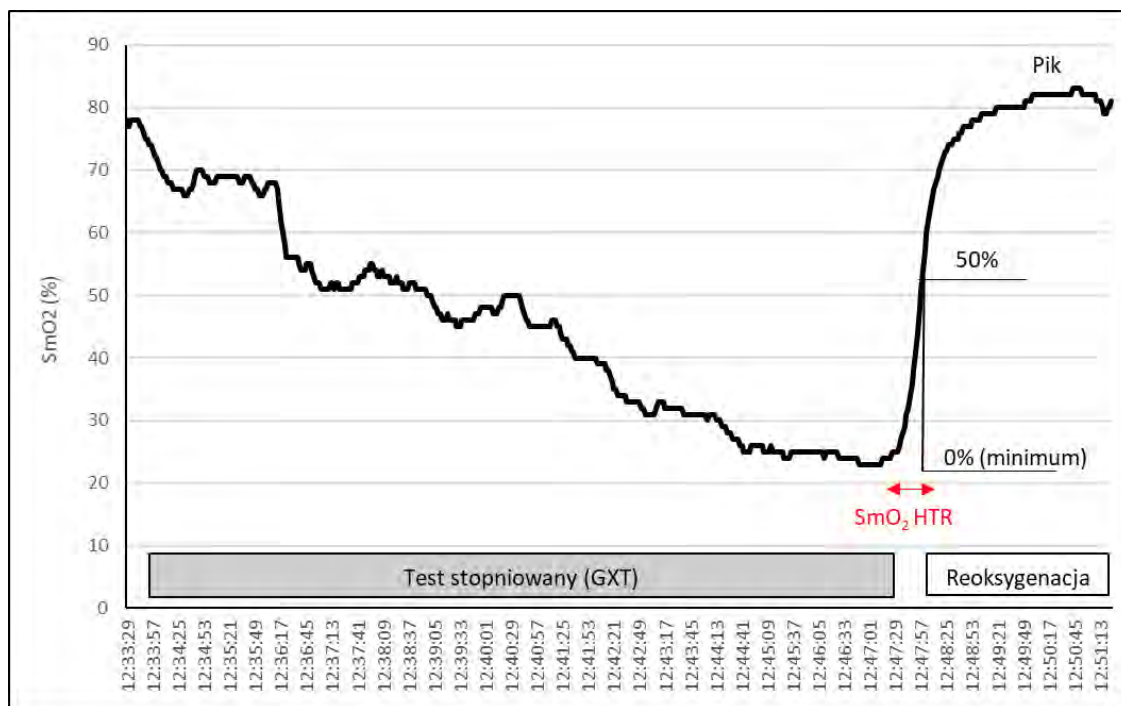
interwałów były wyświetlane „on-line” na ekranie komputera, smartfona czy też rejestratora HR (zegarek Garmin).

Nasycenie tlenem odnosi się do procentowej zawartości hemoglobiny i mioglobiny, które zawierają tlen, co opisuje następujący wzór:

$$SmO_2 (\%) = \frac{\text{Utlenowana hemoglobina} + \text{mioglobina}}{\text{Całkowita hemoglobina} + \text{moglobina}} \times 100$$

Drugi wskaźnik THb jest wskaźnikiem lokalnej objętości krwi (Ferrari i in., 2011). Dane SmO_2 do dalszych analiz były uśredniane z pomiarów dokonywanych co 2 sekundy wyrażone w skali od 0 do 100%. Obliczono również różnice (Δ) SmO_2 pomiędzy wartościami spoczynkowymi a wysiłkowymi. U każdej z badanych osób za minimalny i maksymalny SmO_2 przyjęto za Paquette i in. (2019) najniższe i najwyższe 5 sekundowe wartości średnie osiągnęte w całym badaniu.

Wysiłkowe wartości SmO_2 zostały określone jako deoksygenacja. Przykładowy zapis utlenowania mięśnia obszernego bocznego wraz z procedurą wyznaczania czasu powrotu do 50% maksymalnej wartości utlenowania mięśnia podczas restytucji (ang. *half recovery time*, tempo reoksygenacji, HRT) po teście wysiłkowym o stopniowanej intensywności przedstawiono na Rycinie 1. Bezpośrednio po testach wysiłkowych zastosowano aktywny wypoczynek „cool down” (lekki wysiłek z obciążeniem 0,5 W/kg wykonywany przez 3 minuty po zakończeniu testu), którego celem było uniknięcie szoku ortostatycznego. W spoczynku pomiary były wykonywane w pozycji siedzącej, przy stałym ustawieniu kończyn dolnych.



Rycina 1. Metoda wyznaczania czasu niezbędnego do powrotu do 50% maksymalnej wartości utlenowania mięśnia podczas restytucji (HTR) po teście o stopniowanej intensywności u jednego z badanych studentów, według metody Nagasawy (2013).

Ocena odczucia ciężkości wysiłku

Skala RPE Borga (1982) (ang. *ratings of perceived exertion*) stosowana do oceny postrzegania ciężkości wysiłku posłużyła do oceny intensywności ćwiczeń w teście MLSS u wioślarzy. Skala ta składa się z ocen od 6 do 20 i była wcześniej wykorzystywana m.in. w badaniach wioślarzy (Marriott i Lamb, 1996). Podczas testu była umieszczona w widocznym miejscu, przed badanymi, a oceny dokonywano na 15 sekund przed zakończeniem każdego obciążenia wysiłkowego oraz na zakończenie badania.

3.3. Statystyczna analiza danych

W pierwszej publikacji sprawdzono normalność rozkładów i jednorodność wariancji danych empirycznych wykorzystując testy Shapiro – Wilka i Bartletta oraz wizualną analizę wykresów. Została przeprowadzona jednoczynnikowa analiza wariancji dla powtarzanych pomiarów dla zmiennych LA, HR, SmO₂ oraz THb. Przed interpretacją wyników tej analizy wykonano dodatkowo test Mauchleya. Jeżeli wynik tego testu był negatywny, wiarygodność obliczeń zweryfikowano za pomocą wieloczynnikowej analizy wariancji (λ Wilksa), która nie jest wrażliwa na naruszenie warunku symetrii połączonej. W końcowym etapie obliczeń

zastosowano test Tukeya, który umożliwił szczegółową interpretację istotnych statystycznie różnic pomiędzy średnimi wartościami badanych zmiennych. Wartość efektu (ang. *effect size*) oceniono na podstawie wartości cząstkowego eta kwadrat (η_p^2) w następujący sposób: $0.01 < \eta_p^2 \leq 0.09$ – mała wartość efektu, $0.09 < \eta_p^2 \leq 0.25$ – średnia wartość efektu, i $\eta_p^2 > 0.25$ – duża wartość efektu (Cohen, 2013). Ocenę subiektywnej ciężkości wysiłku w skali RPE Borga badano za pomocą analizy wariancji Friedmana.

W kolejnych publikacjach oceniono statystyczną istotność różnic za pomocą testu Studenta wraz z obliczeniem wielkości efektu Cohena (d) oraz współczynnika korelacji wewnątrzklasowej (ICC). Odpowiednio dla danych, które nie posiadały rozkładów normalnych zastosowano test U Manna – Whitneya. Siłę związków pomiędzy zmiennymi wyznaczono za pomocą testu korelacji rang Spearmana (R) lub współczynników korelacji Pearsona (r) oraz obliczono wartości współczynników determinacji (R^2). Wykresy rozrzutu analizowano pod kątem niezależności obserwacji, liniowości oraz obecności wartości odstających. W celu zobrazowania zgodności pomiędzy zmiennymi przedstawiono wykresy Blanda–Altmana. Przyjęto poziom istotności statystycznej $\alpha = 0,05$.

Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem pakietów statystycznych JASP (JASP Team, Amsterdam, Holandia, wersja 0.17.2) oraz Statistica 13.0 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

4. Wyniki badań

Publikacja nr 1: „The use of muscle near-infrared spectroscopy to assess the aerobic training loads of world-class rowers”

Celem badania było określenie przydatności spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS) do oceny intensywności wysiłków tlenowych o stałej intensywności, okresowo wykonywanych w programie szkolenia wioślarzy.

Podczas trwającego 30 minut wysiłku submaksymalnego (Test MLSS) w interwałach 10 minutowych obserwowano wzrost stężenia LA i HR. Wartości tych parametrów w 30 minucie wysiłku były istotnie statystycznie wyższe niż w 10 minucie wysiłku. W odpowiedzi metabolicznej odnotowano LA wynoszące $2,94 \pm 1,11$ mmol/l (wyrażone jako wartość średnia z pomiarów w 10, 20 i 30 minucie), Tabela 1. U wszystkich zawodników wraz z wydłużaniem czasu trwania wysiłku SmO_2 ulegało stopniowemu obniżeniu. Najniższe, rejestrowane wartości SmO_2 u 5 wioślarzy były poniżej 10%, podczas gdy u pozostałych 3 mieściły się w przedziale 25-30%, Rycina 2. Zarejestrowane obniżenie SmO_2

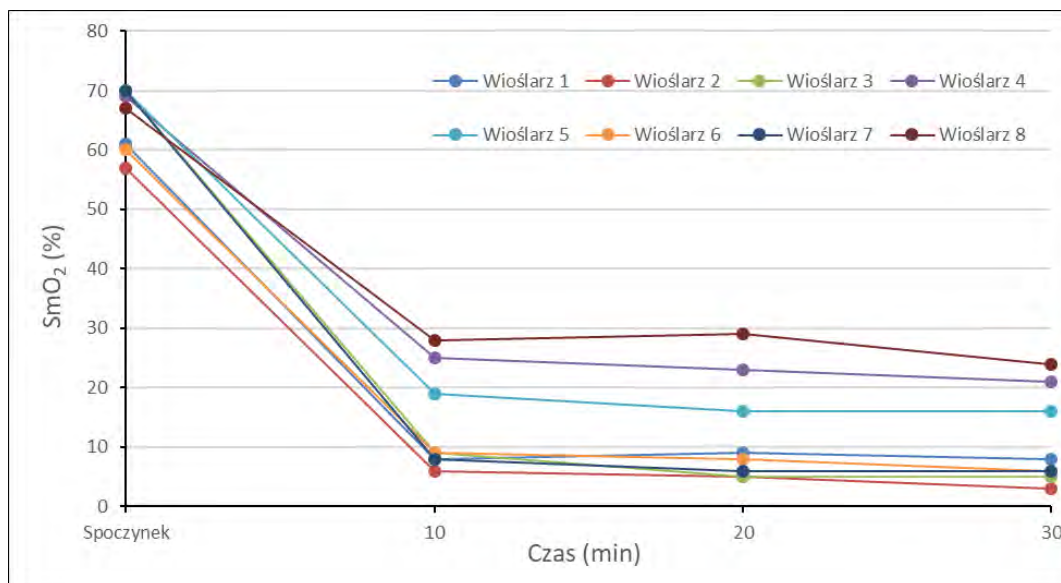
wyrażone jako różnica w stosunku do wartości spoczynkowej (ΔSmO_2) wynosiło $51,5\pm 2,7\%$ w 10 minucie i $54,4\pm 2,6\%$ w 30 minucie, Tabela 1.

W kolejnych minutach 30 minutowego testu wysiłkowego obserwowano stopniowy wzrost subiektywnego odczucia ciężkości wysiłku ocenianego w skali RPE Borga. W 10 minucie wioślarze ocenili wysiłek jako wysiłek „umiarkowany/trochę ciężki” ($12,7\pm 0,5$), w 20 minucie jako wysiłek „trochę ciężki” ($13,6\pm 0,8$) a w 30 minucie jako „trochę ciężki/ciężki” ($14,1\pm 1,0$). Analiza statystyczna nie wykazała jednak istotnych różnic w THb i w ocenie odczuwanej ciężkości wysiłku w zależności od kolejnych, 10 minutowych etapów testu, Tabela 1.

Tabela 1. Moc średnia, stężenie mleczanu we krwi (LA), częstość skurczów serca (HR), utlenowanie mięśnia obszernego bocznego (SmO_2), całkowita hemoglobina (THb) i subiektywna ocena wysiłku w skali Borga (RPE) zarejestrowane podczas 30 min testu (MLSS) u badanych wioślarzy ($n=8$), średnia $\pm$ SD.

Zmienna/Czas	10 min (Średnia $\pm$ SD) 1	20 min (Średnia $\pm$ SD) 2	30 min (Średnia $\pm$ SD) 3
Moc średnia (W)	320,4 $\pm$ 11,7	321,1 $\pm$ 11,9	321,5 $\pm$ 12,0
LA (mmol/l)	2,33 $\pm$ 0,30 ^{2,3}	2,98 $\pm$ 0,40 ^{1,3}	3,51 $\pm$ 0,49 ^{1,2}
HR (sk/min)	158,8 $\pm$ 3,2 ^{2,3}	164,4 $\pm$ 3,5 ^{1,3}	169,0 $\pm$ 3,4 ^{1,2}
SmO_2 (%) ^A	14,0 $\pm$ 3,1 ³	12,6 $\pm$ 3,2 ³	11,1 $\pm$ 2,8 ^{1,2}
ΔSmO_2 (%) ^B	51,5 $\pm$ 2,7 ³	52,9 $\pm$ 3,1 ³	54,4 $\pm$ 2,6 ^{1,2}
THb (g/dl)	13,073 $\pm$ 0,084	13,068 $\pm$ 0,085	13,074 $\pm$ 0,082
RPE (6-20)	12,7 $\pm$ 0,5	13,6 $\pm$ 0,8	14,1 $\pm$ 1,0

Indeks górny w odpowiednim wierszu wskazuje pomiar istotny statystycznie ($p < 0,05$), A - wartości rejestrowane „on line” podczas testu, B – różnica w utlenowaniu mięśnia (ΔSmO_2 - wartość spoczynkowa minus wartość wysiłkowa).



Rycina 2. Wartości utlenowania mięśnia obszernego bocznego (SmO_2) podczas testu 30 min (MLSS) na ergometrze wiosłarskim u badanych wiosłarzy ($n=8$).

Publikacja nr 2: „Usefulness of portable device to establish differences in muscle oxygenation between the Wingate test and graded exercise test: effect of gender on anaerobic and aerobic capacity in speed skaters.”

Celem pracy było porównanie utlenowania mięśnia obszernego bocznego (SmO_2) u łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich podczas dwóch testów wysiłkowych: supramaksymalnego Wingate (WAnT) i o stopniowanej intensywności (GXT). Oceniono również odpowiedź SmO_2 na obydwa wysiłki testowe w zależności od płci. Ponadto określono przydatność pomiarów utlenowania mięśni do oceny wydolności beztlenowej i tlenowej łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich.

W teście WAnT wykazano istotne statystycznie różnice w zakresie mocy maksymalnej i pracy (wyrażonych w wartościach bezwzględnych i w przeliczeniu na masę ciała) w zależności od płci, Tabela 2. Podobnie w teście GXT wykazano istotne statystycznie różnice w zakresie mocy maksymalnej i pułapu tlenowego (wyrażonych w wartościach bezwzględnych i w przeliczeniu na masę ciała) w zależności od płci, Tabela 3.

Natomiast podczas obu testów nie zaobserwowano istotnych różnic w utlenowaniu mięśnia obszernego bocznego między łyżwiarkami a łyżwiarzami szybkimi, Tabela 2 i 3, co potwierdza, że płeć nie była czynnikiem różnicującym wartości wskaźników utlenowania mięśnia obszernego bocznego.

Tabela 2. Wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu Wingate u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, średnia $\pm$ SD.

Zmienna	Łyżwiarki (n=13)	Łyżwiarze (n=14)	p
P _{max} (W)	676 $\pm$ 55	916 $\pm$ 100	$\leq 0,0001$
P _{max} (W/kg)	11,2 $\pm$ 0,7	12,4 $\pm$ 0,8	0,0004
Praca (J)	16130 $\pm$ 925	21768 $\pm$ 2300	0,0003 ^U
Praca (J/kg)	268 $\pm$ 15	297 $\pm$ 15	$\leq 0,0001$
SmO ₂ spoczynkowe (%)	59,3 $\pm$ 6,5	61,2 $\pm$ 6,2	0,4501
SmO ₂ Minimum (%)	8,6 $\pm$ 3,5	9,7 $\pm$ 5,2	0,5478
SmO ₂ Maximum (%)	70,3 $\pm$ 9,6	71,6 $\pm$ 4,5	0,6605
Δ SmO ₂ (%)	50,7 $\pm$ 8,1	51,5 $\pm$ 7,9	0,7853
SmO ₂ HTR (s)	24,3 $\pm$ 11,4	22,7 $\pm$ 4,5	0,6799 ^U

Δ SmO₂ (%) – różnica między SmO₂ spoczynkowym a minimalnym

SmO₂ HTR (s) – połowa czasu potrzebna do powrotu SmO₂ do poziomu spoczynkowego

p – istotna różnica statystyczna pomiędzy łyżwiarkami i łyżwiarzami

^U – test U Manna –Whitney

Tabela 3. Wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu o stopniowanej intensywności u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, średnia $\pm$ SD.

Zmienna	Łyżwiarki (n=13)	Łyżwiarze (n=14)	p
P _{max} (W)	243 $\pm$ 18	353 $\pm$ 45	$\leq 0,0001$
P _{max} (W/kg)	4,04 $\pm$ 0,33	4,77 $\pm$ 0,43	$\leq 0,0001$
VO ₂ max (l/min)	3,18 $\pm$ 0,26	4,53 $\pm$ 0,42	$\leq 0,0001$
VO ₂ max (ml/kg/min)	52,1 $\pm$ 4,6	62,0 $\pm$ 4,8	$\leq 0,0001$
SmO ₂ spoczynkowe (%)	65,2 $\pm$ 9,6	64,3 $\pm$ 7,7	0,7825
SmO ₂ Minimum (%)	13,4 $\pm$ 6,8	12,3 $\pm$ 6,6	0,6917
SmO ₂ Maximum (%)	76,5 $\pm$ 5,2	76,6 $\pm$ 5,7	0,9316
Δ SmO ₂ (%)	51,9 $\pm$ 10,7	52,0 $\pm$ 11,0	0,5934 ^U
SmO ₂ HTR (s)	29,8 $\pm$ 13,1	22,6 $\pm$ 8,7	0,0894 ^U

P_{max} – moc maksymalna

Δ SmO₂ (%) – różnica między SmO₂ spoczynkowym a minimalnym

SmO₂ HTR (s) – połowa czasu potrzebna do powrotu SmO₂ do poziomu spoczynkowego

p – istotna różnica statystyczna pomiędzy łyżwiarkami i łyżwiarzami

^U – test U Manna –Whitney

Tylko w teście GXT zaobserwowano istotne statystycznie korelacje między połową czasu potrzebną do powrotu SmO_2 do poziomu spoczynkowego (SmO_2 HTR) a maksymalnym poborem tlenu wyrażonym w wartościach bezwzględnych ($r = -0,40$, $p < 0,05$) i względnych ($r = -0,39$, $p < 0,05$) oraz pikiem mocy w wartościach bezwzględnych i względnych (odpowiednio $r = -0,40$, $r = -0,49$, $p < 0,05$), Tabela 4. W teście Wingate natomiast tempo reoksygenacji nie zależało od poziomu $\text{VO}_{2\text{max}}$ i piku mocy, Tabela 4.

Tabela 4. Wartości współczynników korelacji Spearmana między maksymalnym poborem tlenu ($\text{VO}_{2\text{max}}$) oraz pikiem mocy (Ppeak) z testu o stopniowanej intensywności a wybranymi wskaźnikami utlenowania mięśnia obszernego bocznego (SmO_2) zarejestrowanymi podczas testu Wingate i testu GXT u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich ($n=27$). W nawiasach przedstawiono przedział wartości dla współczynnika korelacji.

Zmienna	$\text{VO}_{2\text{max}}$		Ppeak	
	(l/min)	(ml/kg/min)	W	W/kg
Test Wingate				
SmO_2 Minimum (%)	0,05 (-0,42 – 0,34)	-0,01 (-0,39 – 0,37)	0,17 (-0,22 – 0,52)	0,19 (-0,20 – 0,53)
ΔSmO_2 (%)	0,08 (-0,31 – 0,45)	0,10 (-0,29 – 0,46)	-0,11 (-0,47 – 0,28)	-0,07 (-0,44 – 0,32)
SmO_2 HTR (s)	-0,18 (-0,21 – 0,52)	-0,17 (-0,52 – 0,22)	-0,19 (-0,53 – 0,24)	-0,33 (-0,63 – 0,06)
Test stopniowany (GXT)				
SmO_2 Minimum (%)	-0,06 (-0,43 – 0,33)	-0,28 (-0,60 – 0,11)	0,15 (-0,24 – 0,50)	0,06 (-0,33 – 0,24)
ΔSmO_2 (%)	0,10 (-0,29 – 0,46)	0,19 (-0,20 – 0,53)	-0,03 (-0,41 – 0,35)	-0,04 (-0,41 – 0,34)
SmO_2 HTR (s)	-0,40* (-0,68 – -0,02)	-0,39* (-0,67 – -0,01)	-0,40* (-0,68 – -0,02)	-0,49* (-0,73 – -0,14)

ΔSmO_2 (%) – różnica między SmO_2 spoczynkowym a minimalnym

SmO_2 HTR (s) – połowa czasu potrzebna do powrotu SmO_2 do poziomu spoczynkowego

* - $p < 0,05$

Nie stwierdzono istotnych korelacji między wskaźnikami utlenowania mięśni a wskaźnikami zdolności wysiłkowej w teście Wingate (mocą maksymalną, pracą i indeksem zmęczenia, Tabela 5.

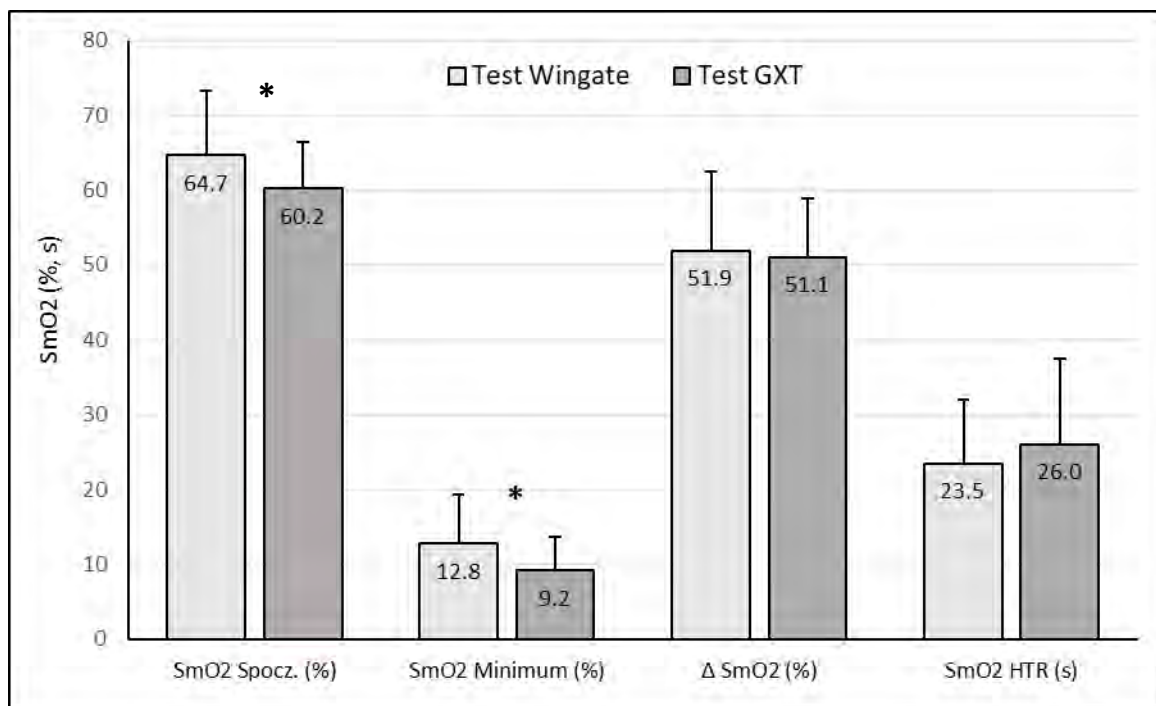
Tabela 5. Wartości współczynników korelacji Spearmana pomiędzy wybranymi wskaźnikami zarejestrowanymi podczas testu Wingate u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich (n=27). W nawiasach przedstawiono przedział wartości dla współczynnika korelacji.

Zmienna	Moc Max		Praca		Indeks zmęczenia	
	(W)	(W/kg)	(J)	(J/kg)	%	W/s
ΔSmO_2 (%)	0,05 (-0,34 – 0,42)	0,34 (-0,05 – 0,64)	0,10 (-0,29 – 0,46)	0,31 (-0,08 – 0,62)	-0,36 (-0,65 – 0,02)	-0,19 (-0,53 – 0,20)
SmO_2 HTR (s)	0,10 (-0,29 – 0,46)	0,05 (-0,34 – 0,42)	0,06 (-0,33 – 0,43)	0,02 (-0,36 – 0,40)	0,20 (-0,19 – 0,54)	0,02 (-0,36 – 0,40)
SmO_2 Minimum (%)	0,13 (-0,26 – 0,49)	0,03 (0,35 – 0,41)	0,13 (-0,26 – 0,49)	0,02 (-0,36 – 0,40)	0,17 (-0,22 – 0,52)	0,16 (-0,23 – 0,51)

ΔSmO_2 (%) – różnica między SmO_2 spoczynkowym a minimalnym

SmO_2 HTR (s) – połowa czasu potrzebna do powrotu SmO_2 do poziomu spoczynkowego

Istotne statystycznie różnice dla łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich łącznie (n=27) stwierdzono w spoczynkowych oraz minimalnych wartościach SmO_2 (deoksygenacji), które były istotnie wyższe po teście WAnT niż po teście GTX i wynosiły odpowiednio $64,7 \pm 8,5\%$ i $12,8 \pm 6,6\%$ oraz $60,2 \pm 6,3\%$ oraz $9,2 \pm 4,4\%$. Natomiast różnica (ΔSmO_2) między wartościami spoczynkowymi jak i minimalnymi oraz połowa czasu potrzebna do powrotu SmO_2 do poziomu spoczynkowego (SmO_2 HTR) nie różniły się istotnie w zależności od rodzaju testu wysiłkowego zarówno, Rycina 3.



Rycina 3. Utlenowanie mięśnia obszernego bocznego (SmO₂): w spoczynku i minimalna wartość wysiłkowa, różnica między spoczynkową i minimalną wysiłkową wartością (Δ SmO₂) oraz połowa czasu potrzebna do powrotu SmO₂ do poziomu spoczynkowego (SmO₂ HTR).

Publikacja nr 3: „Estimation of lactate thresholds for muscle oxygenation in high-trained speed skaters, and healthy, non-training individuals”

Głównym celem badań było określenie utlenowania mięśni (metodą spektroskopii w bliskiej podczerwieni, NIRS) na poziomie progów mleczanowych (tlenowego i przemian beztlenowych) u kobiet i mężczyzn: wysoko wytrenowanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich oraz zdrowych, nietrenujących osób studentek i studentów. Ponadto, oceniono w jakim stopniu utlenowanie mięśni na poziomie progu beztlenowego oraz po wysiłku maksymalnym jest zależne od poziomu wytrenowania.

Łyżwiarki i łyżwiarze szybcy cechowali się wyższą wydolnością fizyczną w porównaniu do studentek i studentów, co potwierdziły istotne różnice między grupami w zakresie mocy maksymalnej na poziomie VO₂max (ang. *maximal aerobic power*, MAP) i VO₂max, Tabela 6.

Tabela 6. Maksymalne wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu o stopniowanej intensywności w badanych grupach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich (n=27) oraz studentek i studentów (n=29), średnia±SD.

Zmienna	Łyżwiarki (n=13)	Studentki (n=13)	Łyżwiarze (n=14)	Studenci (n=16)
Czas testu (min:s)	16:59 ± 1:51	16:51 ± 2:10	18:05 ± 2:07	18:32 ± 2:17
MAP (W)	243 ± 18*	169 ± 22	353 ± 45*	258 ± 32
MAP (W/kg)	4,04 ± 0,33*	2,82 ± 0,37	4,77 ± 0,43*	3,10 ± 0,45
VO ₂ max (l/min)	3,18 ± 0,26*	2,28 ± 0,28	4,53 ± 0,42*	3,58 ± 0,54
VO ₂ max (ml/kg/min)	52,1 ± 4,6*	38,0 ± 3,7	62,0 ± 4,8*	42,9 ± 6,7
Mleczan (mmol/l)	13,1 ± 1,3*	10,7 ± 1,7	13,5 ± 2,3*	11,8 ± 1,8

MAP – maksymalna moc tlenowa

Mleczan – powysiłkowe stężenia mleczanu we krwi

* - różnice istotne statystycznie między łyżwiarkami a studentkami oraz łyżwiarzami a studentami (p < 0,05)

Wartości mocy dla progu tlenowego jak i trzech najczęściej stosowanych progów beztlenowych: AT4, mDmax i LT (W jak i W/kg) były istotnie wyższe u łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich w odniesieniu odpowiednio do studentek i studentów. Procentowe wartości utlenowania mięśni na poziomie wymienionych progów beztlenowych były istotnie niższe u łyżwiarek szybkich aniżeli u studentek. Takich różnic nie obserwowano w odniesieniu do progu tlenowego. U łyżwiarzy szybkich i studentów chociaż omawiane wyżej różnice nie były istotne statystycznie, to wykazywały podobny kierunek zmian, Tabela 7.

Tabela 7. wartości wybranych wskaźników wyznaczonych dla progu tlenowego i progów beztlenowych w badanych grupach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich (n=27) oraz studentek i studentów (n=29), średnia±SD.

Zmienna	Łyżwiarki (n=13)	Studentki (n=13)	Łyżwiarze (n=14)	Studenci (n=16)
P _{AT2 MMOL} (W)	122 ± 35*	68 ± 22	201 ± 35*	103 ± 28
P _{AT2 MMOL} (W/kg)	2,00 ± 0,64*	1,14 ± 0,34	2,72 ± 0,57*	1,25 ± 0,43
P _{AT4} (W)	183 ± 21*	114 ± 19	267 ± 41*	173 ± 27
P _{AT4} (W/kg)	3,04 ± 0,41*	1,90 ± 0,29	3,62 ± 0,46*	2,08 ± 0,40
P _{mDMAX} (W)	180 ± 22*	112 ± 13	263 ± 43*	173 ± 22
P _{mDMAX} (W/kg)	3,00 ± 0,45*	1,88 ± 0,25	3,56 ± 0,44*	2,08 ± 0,33
P _{LT} (W)	169 ± 21*	105 ± 12	253 ± 48*	177 ± 22
P _{LT} (W/kg)	2,82 ± 0,44*	1,77 ± 0,29	3,41 ± 0,48*	2,13 ± 0,29
SmO _{2 2MMOL} (%)	48,8 ± 11,2	52,2 ± 13,1	42,5 ± 7,7	45,0 ± 13,2
SmO _{2AT4} (%)	32,7 ± 11,5*	45,2 ± 11,1	28,3 ± 8,6	30,5 ± 15,5
SmO _{2mDMAX} (%)	31,0 ± 9,2*	44,3 ± 10,3	29,4 ± 6,5	32,5 ± 13,3
SmO _{2LT} (%)	33,9 ± 9,6*	45,6 ± 10,5	30,4 ± 7,1	31,8 ± 13,1

P_{AT2 MMOL} – próg tlenowy (mleczan = 2 mmol/l)

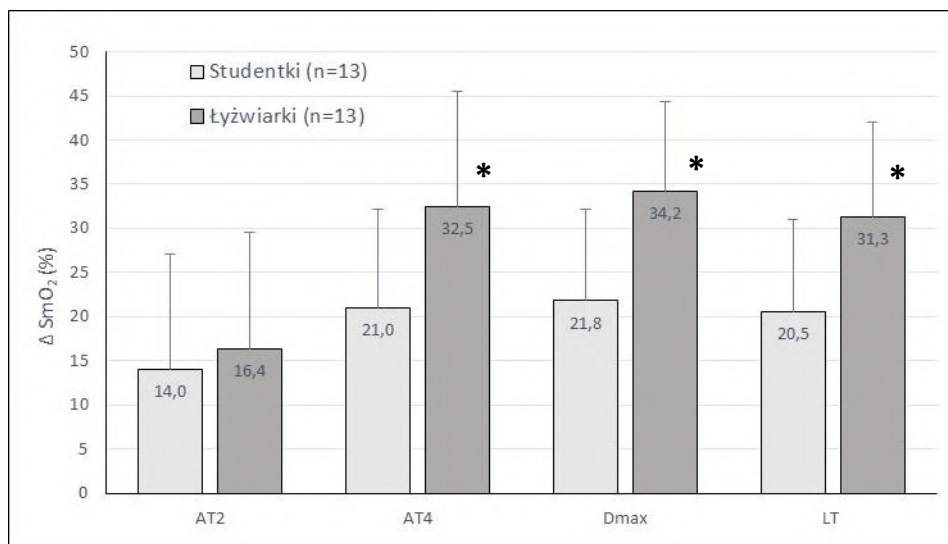
P_{AT4} – próg beztlenowy (mleczan = 4 mmol/l)

P_{mDMAX} – zmodyfikowany próg beztlenowy Dmax

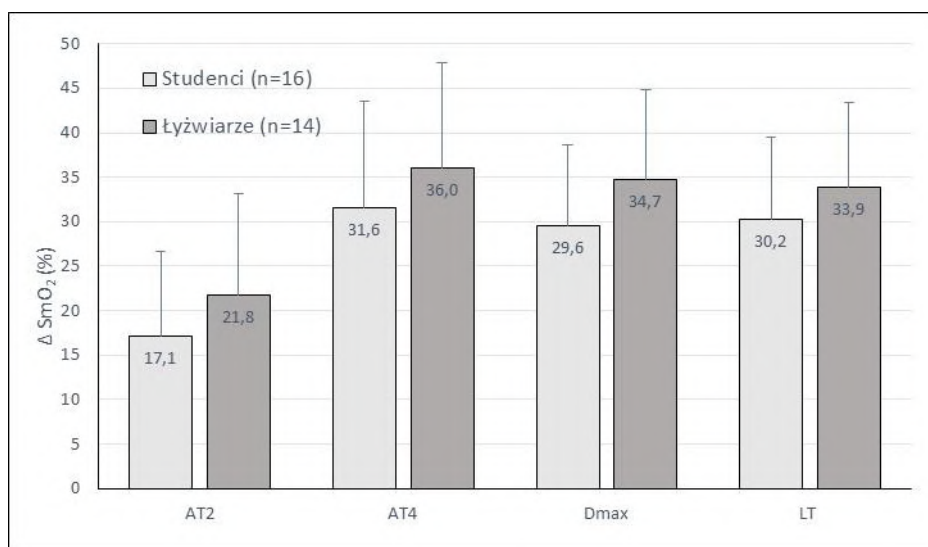
P_{LT} – próg mleczanowy

* - różnice istotne statystycznie między łyżwiarkami a studentkami oraz łyżwiarzami a studentami
(p < 0,05)

Jedynie łyżwiarki szybkie wykazały istotnie większe spadki utlenowania mięśni (ΔSmO_2) dla progów beztlenowych: AT_4 , mDmax i LT w porównaniu do studentek, Rycina 4. U mężczyzn obserwowano podobne zmiany lecz nie były one istotne statystycznie, Rycina 5.

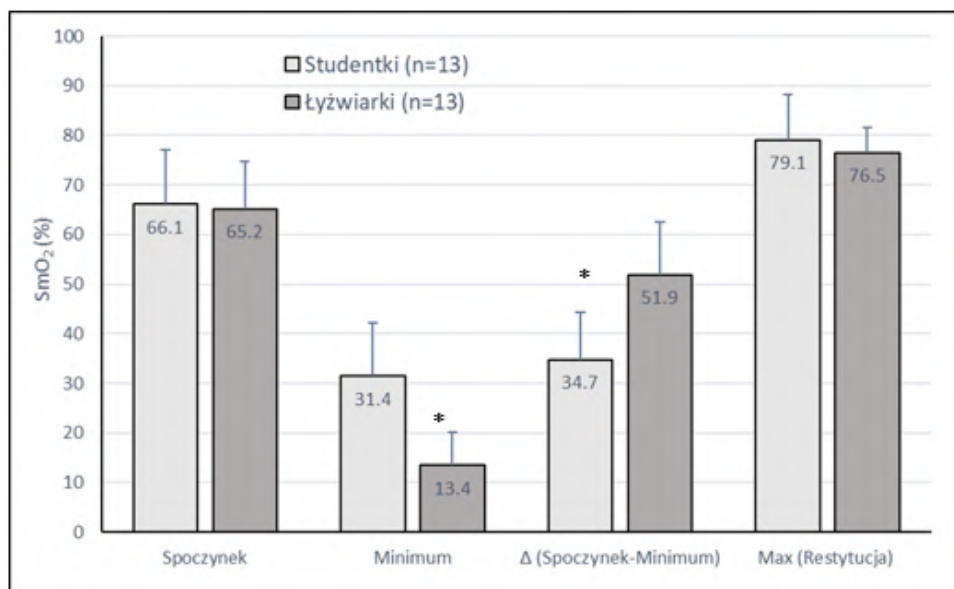


Rycina 4. Utlenowanie mięśni na poziomie progu tlenowego (AT_2) i trzech progów beztlenowych (AT_4 , mDmax , LT) wyrażonych jako Δ (SmO_2 spoczynkowe minus SmO_2 progowe) w grupie studentek i łyżwiarek, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$).

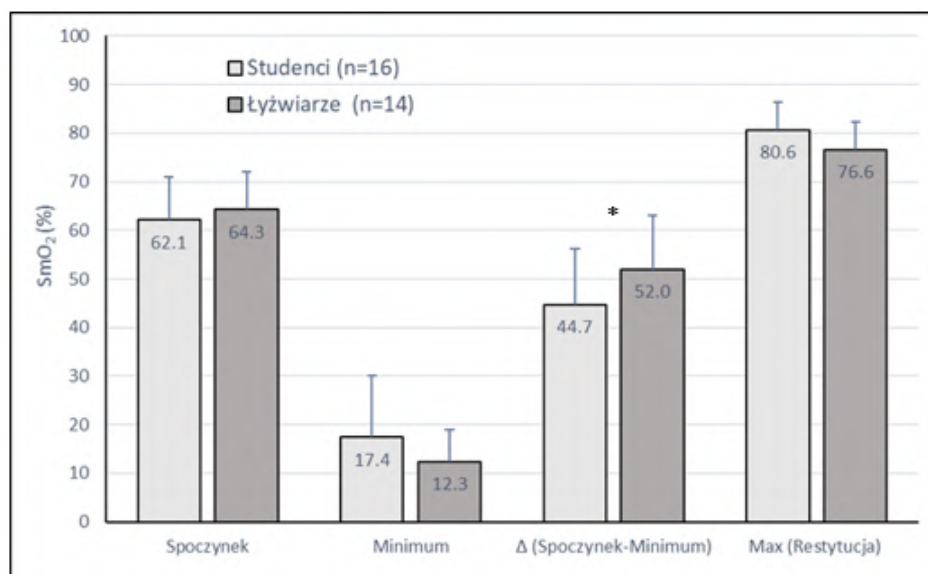


Rycina 5. Utlenowanie mięśni na poziomie progu tlenowego (AT_2) i trzech progów beztlenowych (AT_4 , mDmax , LT) wyrażonych jako Δ (SmO_2 spoczynkowe minus SmO_2 progowe) w grupie łyżwiarzy i studentów.

U łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, w porównaniu odpowiednio do studentek i studentów, w GXT obserwowano istotnie większe spadki utlenowania mięśni wyrażone jako różnica pomiędzy poziomem spoczynkowym i minimalnym (Δ), Rycina 6 i 7. Ponadto u łyżwiarek w odniesieniu do studentek stwierdzono istotnie niższą wartość minimalną utlenowania mięśni, Rycina 6.

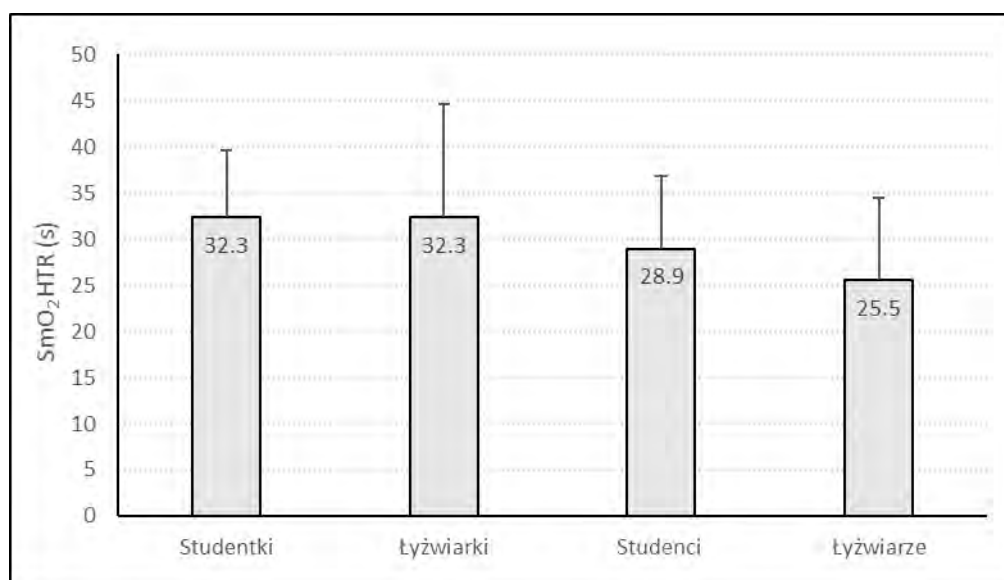


Rycina 6. Utlenowanie mięśni (SmO_2): w spoczynku, wartości minimalne, a także różnica pomiędzy wartością spoczynkową a minimalną (Δ) oraz maksymalne wartości w okresie restytucji podczas testu o stopniowanej intensywności u studentek i łyżwiarek, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) między studentkami i łyżwiarkami.

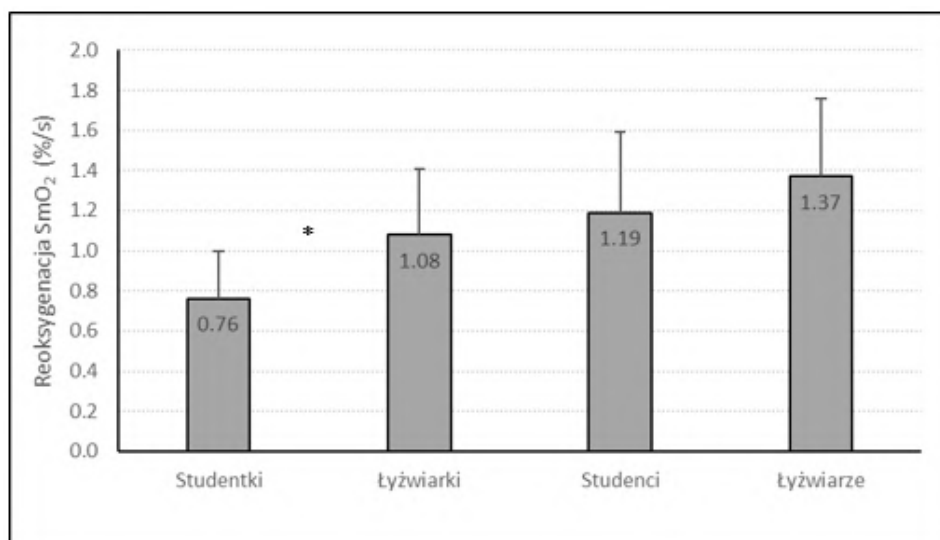


Rycina 7. Utlenowanie mięśni (SmO₂): w spoczynku, wartości minimalne, różnica pomiędzy wartością spoczynkową a minimalną (Δ) oraz maksymalne wartości w okresie restytucji podczas testu o stopniowanej intensywności u studentów i łyżwiarzy, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) pomiędzy studentami i łyżwiarzami.

Płeć nie różnicowała wprowadzie tempa restytucji w odniesieniu do uzyskania połowy czasu potrzebnego do powrotu SmO₂ do poziomu spoczynkowego (SmO_{2HTR}), to stwierdzono jednak wyższe tempo reoksygenacji SmO₂ (%/s) u łyżwiarek szybkich w porównaniu do studentek, Rycina 8 i 9.



Rycina 8. Połowa czasu powrotu utlenowania mięśni do poziomu spoczynkowego (SmO_{2HTR}) w badanych grupach studentek i łyżwiarek szybkich oraz studentów i łyżwiarzy szybkich.



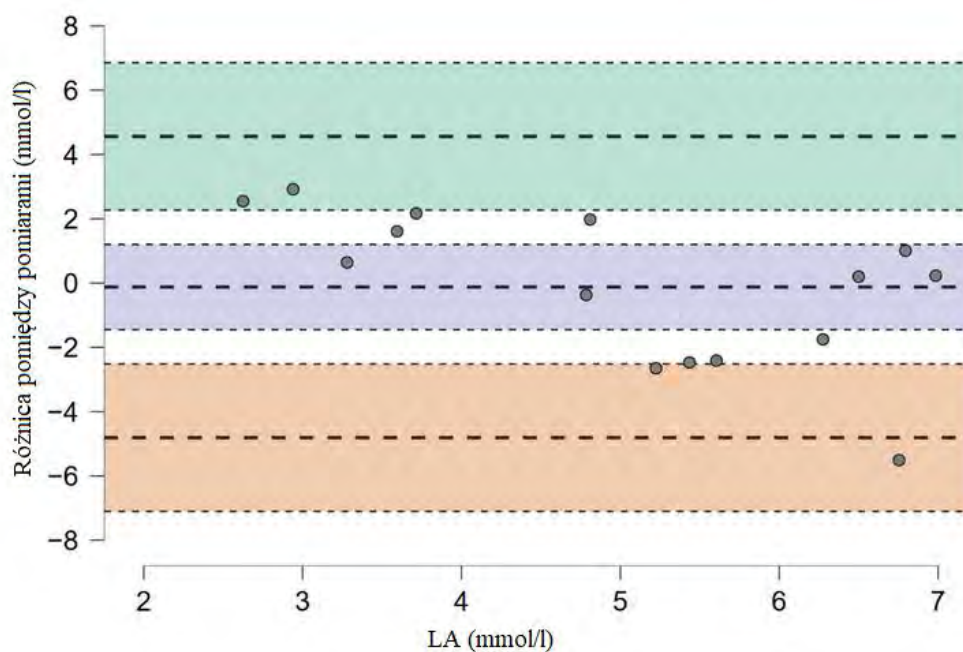
Rycina 9. Tempo reoksygenacji utlenowania mięśni (SmO₂) w grupach studentów i łyżwiarzy, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) między studentkami i łyżwiarkami.

Publikacja nr 4: „Transferability of exercise intensity based on muscle oxygenation from normoxia to hypoxia in ski-mountaineering athletes - exploratory study”

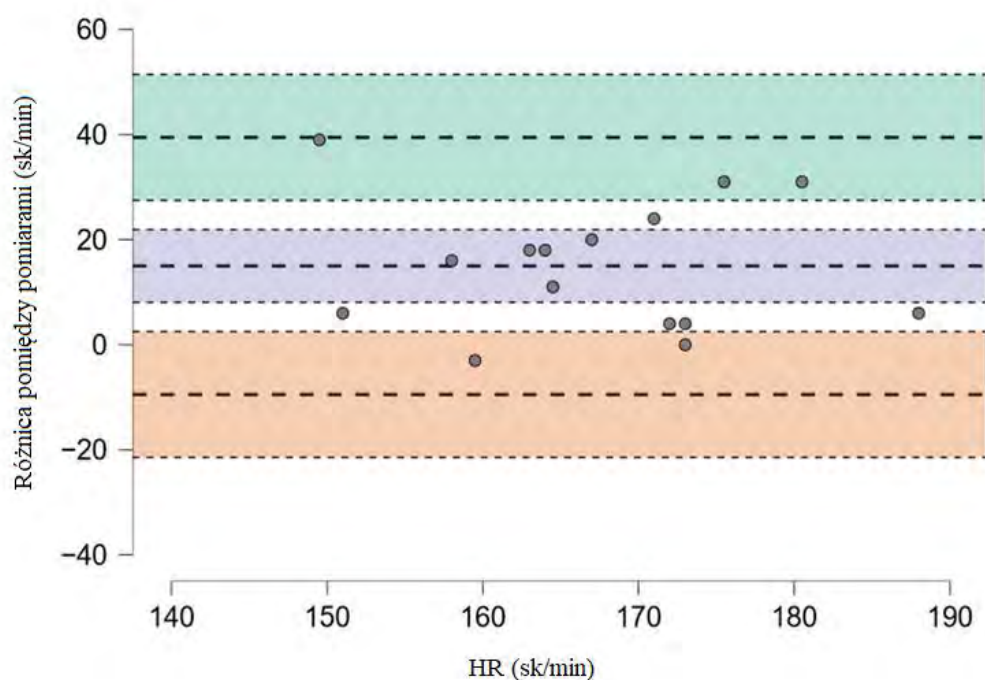
Podstawowym zamierzeniem autorów było sprawdzenie przydatności pomiarów utlenowania mięśni w warunkach różnej dostępności tlenu w praktyce treningowej u wysoko wytrenowanych zawodników narciarstwa wysokogórskiego. W tym celu w oparciu o pomiary SmO₂, HR i LA podczas GXT w normoksji, w warunkach laboratoryjnych określono AT₄ i indywidualne strefy intensywności wysiłku. Następnie dokonano weryfikacji wyznaczonych wskaźników podczas testu MLSS w warunkach hipoksji normobarycznej odwzorowującej wysokość ok. 3000 m n.p.m. Zadaniem badanych było utrzymywanie takiego samego SmO₂ jak przy AT₄ w normoksji. Zamierzeniem było udzielić odpowiedzi na pytanie: czy SmO₂ jest bardziej stabilnym wskaźnikiem intensywności wysiłku niż HR lub LA, gdy zmienia się wysokość nad poziomem morza.

Podczas testu MLSS, gdy intensywność wysiłku była utrzymywana w oparciu o utlenowanie mięśni (SmO₂AT₄) u 11 z 15 (73%) zawodników stężenie mleczanu we krwi nie wzrosło o więcej niż 1 mmol/l. Częstość skurczów serca w hipoksji była znacznie niższa (o 15 sk./min) niż w normoksji, przy tym samym SmO₂, nie wykazano natomiast istotnych statystycznie różnic w stężeniach LA. Analiza zgodności metod wykazała umiarkowaną zgodność pomiarów stężenia mleczanu (ICC = 0,56; 95% CI: 0,24–0,85) oraz niską do umiarkowanej zgodność HR (ICC = 0,40; 95% CI: –0,75–0,80). Zgodność pomiędzy

porównywanymi warunkami oceniono również za pomocą wykresów Bland–Altmana, Rycina 10 i 11.

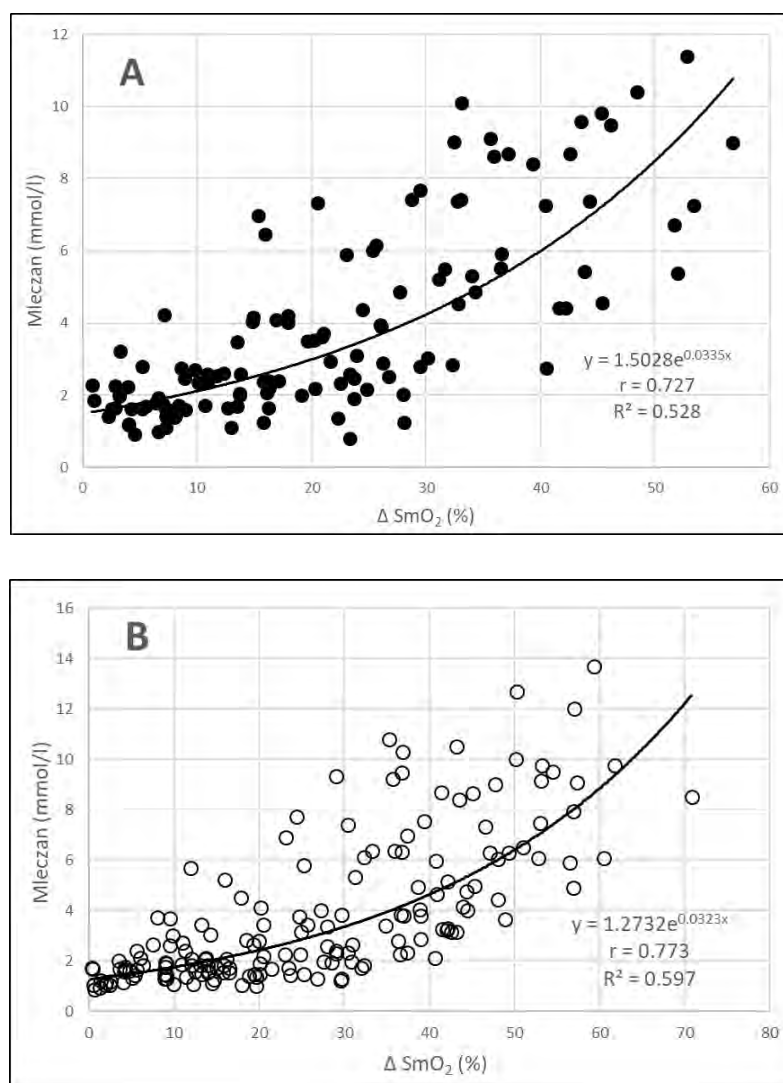


Rycina 10. Wykres Blanda–Altmana przedstawiający zgodność pomiędzy stężeniem mleczanu we krwi (LA) na progu beztlenowym (AT₄) w normoksji, a średnimi wartościami podczas testu MLSS w hipoksji, odpowiadającymi równoważnym wartościom SmO₂.



Rycina 11. Wykres Blanda–Altmana przedstawiający zgodność pomiędzy częstością skurczów serca (HR) na progu beztlenowym (AT₄) w warunkach normoksji, a średnimi wartościami podczas testu MLSS w warunkach hipoksji, odpowiadającymi równoważnym wartościom SmO₂.

W badaniach własnych (dane niepublikowane) wykazano również w grupach kobiet (łyżwiarki i studentki, $n=25$) i mężczyzn (łyżwiarze i studenci, $n=30$) istotną, dodatnią, zależność między utlenowaniem mięśni a stężeniem mleczanu we krwi. Najlepiej tę zależność zarówno w przypadku kobiet jak i mężczyzn opisuje regresja wykładnicza. Analiza stężenia LA i ΔSmO_2 dla grup kobiet jak i mężczyzn wykazała stosunkowo niskie wartości współczynnika determinacji (R^2) dla tych zależności (0,528 u kobiet i 0,597 u mężczyzn), co wynikało ze znacznego rozrzutu wartości tych wskaźników, Rycina 12.



Rycina 12. Zależność pomiędzy stężeniem mleczanu we krwi a utlenowaniem mięśnia obszerne go bocznego wyrażonego jako Δ (różnica między SmO_2 spoczynkowym i wysiłkowym) podczas testu o stopniowanej intensywności w grupach kobiet $n=25$ (A) i mężczyzn $n=30$ (B), uwzględniono jedynie pełne 3 minutowe wysiłki.

5. Dyskusja

Ważnym osiągnięciem spośród czterech opublikowanych prac, stanowiących podstawę postępowania o nadanie tytułu doktora nauk o kulturze fizycznej, było wykazanie, że u elity wioślarzy seniorów monitory utlenowania mięśni były wiarygodnym i przydatnym narzędziem dla wyznaczania intensywności treningowej, a szczególnie obciążeń na poziomie stanu MLSS (Publikacja 1). Wartym podkreślenia jest fakt, że opisaną technologię pomiarów utlenowania mięśni za pomocą NIRS cechuje nieinwazyjność i niskie koszty. W przytoczonych badaniach wioślarzy wysoka intensywność treningu tlenowego w wysiłku na ergometrze wioślarskim charakteryzowała się istotnym obniżeniem SmO_2 pomiędzy 10 a 30 minutą wysiłku. Wyrażone jako różnica w stosunku do wartości spoczynkowej (ΔSmO_2) wynosiło od $51,5 \pm 2,7\%$ w 10 minucie do $54,4 \pm 2,6\%$ w 30 minucie (Tabela 1, Rycina 2). W odróżnieniu od przytoczonych badań wioślarzy polskich, Snyder i in. (2009) w 30 minutowym submaksymalnym wysiłku na bieżni mechanicznej, nie zaobserwowali istotnego obniżenia SmO_2 zarówno dla obciążenia odpowiadającego MLSS jak i nieco powyżej maksymalnej równowagi mleczanowej. Podobne wartości ΔSmO_2 do badań własnych wioślarzy zaobserwowano u kanadyjkarzy w warunkach naturalnych (Paquette i in. 2018). Wskaźnik ten (monitor Moxy także umiejscowiony na mięśniu obszernym bocznym), podczas dwóch kontrolnych przejazdów na dystansie 200, 500 lub 1000 m na wodzie wynosił u tych zawodników odpowiednio $52 \pm 17\%$ i $51 \pm 18\%$. Mniejszą wartość ΔSmO_2 , czyli różnicę SmO_2 między wartościami spoczynkowymi a minimalnymi podczas wysiłku, obserwowali wymienieni autorzy u kajakarzy, u których zaangażowanie mięśni kończyn dolnych podczas wiosłowania na podobnych dystansach było mniejsze niż u kanadyjkarzy i ΔSmO_2 wynosiła odpowiednio $46 \pm 26\%$ oraz $43 \pm 14\%$.

Kolejne istotne zagadnienie w badaniach własnych, stanowiła weryfikacja przydatności stężenia całkowitej hemoglobiny we krwi (THb), mierzonego metodą NIRS, jako wskaźnika do oceny reakcji fizjologicznej organizmu na intensywne wysiłki wytrzymałościowe. Uzyskane wyniki wykazały małą wartość diagnostyczną wskaźnika THb do oceny odpowiedzi organizmu w teście MLSS. Wartości tego wskaźnika, w przeciwieństwie do SmO_2 , nie uległy istotnym zmianom w kolejnych 10 minutowych odcinkach wysiłku testowego (Tabela 1). Podobnie, brak zależności THb ze zmianami poboru tlenu i HR stwierdzono podczas testu o stopniowanej intensywności (Crum i in. 2017).

Pogłębioną analizę stanowiła próba odpowiedzi na pytanie czy poziom utlenowania mięśni jest zależny od stopnia wytrenowania i płci. Ponadto oceniono utlenowanie mięśni w zależności od rodzaju testu wysiłkowego: supramaksymalnego oraz maksymalnego. W badaniach wzięła udział elita łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, specjalizujących się w sprinterskich lub długich dystansach startowych (Publikacja nr 2). Przeprowadzono ocenę korelacji między SmO_2 a najistotniejszymi wskaźnikami wysiłkowymi: mocą maksymalną i pracą w teście WAnT oraz pikiem mocy i VO_{2max} w teście GXT (Tabela 4 i 5). Stwierdzono, że wskaźniki SmO_2 nie korelowały istotnie z wielkością mocy maksymalnej w teście WAnT, co sugeruje ograniczoną przydatność diagnostyczną NIRS w ocenie zdolności do generowania mocy w wysiłkach supramaksymalnych. Warto podkreślić, jak wynika z badań, że tego rodzaju pomiary mogą mieć jednak istotne znaczenie w doborze wielkości obciążenia treningowego np. w interwałach o wysokiej intensywności (Paquette i in., 2021).

Również VO_{2max} w teście GXT nie wykazywał istotnych zależności z utlenowaniem mięśni, co wskazuje, że w wysiłkach maksymalnych pomiar odpowiedzi wysiłkowej całego organizmu, określany przez VO_{2max} , nie był bezpośrednio związany z wartościami wskaźników utlenowania mięśni (SmO_2 Minimum i ΔSmO_2) mierzonymi lokalnie (Tabela 4).

U łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich w opisanych powyżej testach wysiłkowych mierzono także szybkość reoksygenacji, określaną jako połowa czasu (wyrażanego w sekundach), jaki jest potrzebny do powrotu utlenowania mięśni do poziomu spoczynkowego (SmO_{2HTR}). Po teście WAnT nie stwierdzono zależności pomiędzy szybkością reoksygenacji a wielkością maksymalnego poboru tlenu wyrażonego w wartościach bezwzględnych jak i przeliczonych na masę ciała. Z kolei Nagasawa (2013) obserwował wolniejszą reoksygenację SmO_2 po teście WAnT u biegaczy długodystansowych w porównaniu z grupą sprinterów i grupą kontrolną zdrowych, nietreningujących osób.

Odmienne wyniki uzyskano w teście GXT, gdzie czas reoksygenacji mięśnia (SmO_{2HTR}) istotnie, ujemnie korelował z VO_{2max} oraz z maksymalną mocą tlenową (P_{max}). Ujemna korelacja wskazuje, że zawodnicy o wyższej wydolności tlenowej uzyskują krótszy czas powrotu utlenowania mięśni po zakończeniu wysiłku. Podobnie Ichimura i in. (2006) wykazali, że tempo reoksygenacji mięśni po teście rampowym, było szybsze u zawodników z wyższym VO_{2max} .

Interesującym zagadnieniem nierozpoznanym dostatecznie, było udzielenie odpowiedzi na pytanie czy w badanych grupach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich wskaźniki

utlenowania mięśni zarejestrowane podczas wysiłków o charakterze beztlenowym (w teście WAnT) i tlenowym (w teście GXT) były zależne od płci (Tabela 2 i 3). Nie zaobserwowano jednak istotnych różnic międzypłciowych w zakresie utlenowania mięśni w obu testach, pomimo istotnie wyższych wartości wskaźników wydolnościowych u mężczyzn. Prawdopodobnie niezależnie od płci badanych wraz ze wzrostem wytrenowania poprawie ulegają czynniki usprawniające dostarczenie tlenu do pracujących mięśni. Istotne znaczenie przypisuje się w tym przypadku wzrostowi kapilaryzacji mięśni i objętości krwi wpływającej na pojemność minutową serca, a także objętości krwinek czerwonych, czy też całkowitej masy hemoglobiny (Heinicke i in., 2001; Malczewska-Lenczowska i in., 2013; Steiner i in., 2019; Zelenkova i in., 2019).

Istotną kontynuację badań własnych stanowiła próba określenia czy SmO_2 wyznaczone dla często stosowanych progów beztlenowych (opartych o stężenie mleczanu we krwi) może stanowić nieinwazyjny, przydatny wskaźnik do kontroli obciążeń treningowych (Publikacja nr 3). Powszechnie do wyznaczenia progu beztlenowego wykorzystuje się stężenia mleczanu we krwi, uznawane za tzw. „złoty standard”. Jednak szczególne zalety mają metody wyznaczenia progu beztlenowego nie wymagające pobierania krwi. W ostatnich latach, często wykorzystuje się w tym celu wskaźnik SmO_2 w oparciu o technologię NIRS (Borges i Driller, 2016; Cayot i in., 2021; Farzam i in., 2018; McMorries i in., 2019; Raleigh i in., 2018). Praktyczne wykorzystanie tego wskaźnika wzrasta, co wynika z niskiego kosztu pomiaru NIRS za pomocą mobilnej aparatury, którą może obsługiwać trener lub zawodnik, umożliwiając ciągłe pomiary w czasie rzeczywistym treningu.

Z przytoczonych powyżej względów podejmowano zarówno próby oznaczania progu beztlenowego w oparciu o przebieg zmian SmO_2 jak i walidacji tych metod. Na przykład Grassi i in. (1999) obserwowali istotną korelację pomiędzy progiem dla utlenowania mięśni (TSI_T) a progiem mleczanowym wyznaczonym dla stężenia mleczanu we krwi wynoszącego 4 mmol/l. Podobnie Driller i in. (2016) wskazywali na dopuszczalny poziom zgodności między TSI_T a tradycyjnie wyznaczonymi progami mleczanowymi w licznej grupie biegaczy i kolarzy o zróżnicowanym poziomie wytrenowania. Odmienne wyniki badań uzyskał Cayot i in. (2021) wykazując, że wyznaczone na podstawie SmO_2 progi D_{max} (ang. *maximum distance*) jak i mD_{max} (ang. *modified maximum distance*) nie są zalecane do rutynowego szacowania progu beztlenowego na podstawie sygnału NIRS z powodu niewystarczającej test-retest powtarzalności. Również Raleigh i in. (2018) nie stwierdzili zgodności progu wyznaczonego z pomiarów utlenowania mięśni (TSI_T) z

progiem LT. Brak zgodności progu TSI_T z progiem mleczanowym można wiązać z faktem, że deoksygenacja mierzona jest na niewielkim obszarze pracującego mięśnia do śledzenia odpowiedzi mikrokążenia podczas wysiłku, natomiast wyznaczanie mleczanowych progów beztlenowych jak i wentylacyjnego, odzwierciedlają całkowitą odpowiedź fizjologiczną organizmu na zadany wysiłek. Podczas wysiłku na cykloergometrze oprócz mięśnia obszernego bocznego (którego deoksygenację mierzono) pracują też inne mięśnie, które także wpływają na wytwarzanie mleczanu.

Przytoczone odmienne wyniki badań nad przydatnością progów wyznaczonych z pomiarów utlenowania mięśni (TSI_T) skłoniły do badań własnych. Jednym z głównych celów tych badań było sprawdzenie jakie wartości SmO_2 odpowiadają często stosowanym progom mleczanowym (progowi tlenowemu, D_{max} , mD_{max} , AT_4 i LT) u osób o zróżnicowanym poziomie wytrenowania. Podkreślić należy, że w dostępnym piśmieniu dotyczącym tego zagadnienia, prowadzono badania wyłącznie wśród osób wytrenowanych (Farzam i in., 2018; McMorries i in., 2019; Raleigh i in., 2018) lub u osób trenujących rekreacyjnie (Cayot i in., 2021).

Przyjęto, że wyznaczone w ten sposób progowe wartości SmO_2 mogą być pomocne do fizjologicznej kontroli różnych obciążeń treningowych. Progowe SmO_2 wyrażano w wartościach bezwzględnych ($SmO_2\%$) lub jako różnicę między wartością spoczynkową a wartością progową ($\Delta SmO_2\%$) (Ryciny 3-6). Wykazano, że na poziomie progu beztlenowego większą wartość diagnostyczną ma utlenowanie mięśni wyrażone jako $\Delta SmO_2\%$, niż jako $SmO_2\%$. Wynika to z dużego indywidualnego zróżnicowania wartości spoczynkowych SmO_2 , mającego wpływ na wielkość progowej deoksygenacji. U badanych o wyższej wydolności fizycznej (łyżwiarki i łyżwiarze szybcy) obserwowano większe obniżenie $\Delta SmO_2\%$ na poziomie progu beztlenowego niż u studentek i studentów (Tabela 7). Analogicznie, jak w przypadku progu beztlenowego, po wysiłku maksymalnym większe obniżenie $\Delta SmO_2\%$ stwierdzono u badanych o wyższej wydolności fizycznej.

Taki sam sposób wyrażania deoksygenacji mięśnia ($\Delta SmO_2\%$) zastosował Cayot i in. (2021) także wykazując, że większą zdolność do deoksygenacji pracujących mięśni w wysiłkach maksymalnych uzyskiwały osoby trenujące w porównaniu do osób nietrenujących. Okushima i in. (2016) z kolei dowiedli, że osoby trenujące, z wyższym VO_{2Peak} , charakteryzuje większa zdolność do sprawnego wykorzystania tlenu przez pracujące mięśnie, gdy obserwuje się większą deoksygenację podczas wysiłku maksymalnego w porównaniu do osób z niższym poziomem wydolności tlenowej. W innych badaniach (Paquette i in. 2018) pomiary deoksygenacji również wyrażone jako ΔSmO_2

potwierdziły, że sprawność mięśni do ekstrakcji tlenu nawet silniej determinuje zdolność startową kajakarzy i kanadyjkarzy sprinterów aniżeli $\text{VO}_{2\text{max}}$.

Kolejne w cyklu badania dotyczyły oceny użyteczności pomiarów SmO_2 do monitorowania odpowiedzi wysiłkowej w warunkach sztucznej hipoksji (Publikacja nr 4). W tym celu porównano odpowiedź wysiłkową SmO_2 w warunkach w normoksji i symulowanej hipoksji normobarycznej (ok. 3000 m n.p.m.). Analizowano różne obciążenia wysiłkowe, przy stałym poziomie SmO_2 (Rycina 10 i 11). W warunkach sztucznej hipoksji kryterium MLSS zostało spełnione u większości zawodników (73% badanych). Dane te potwierdziły, że u czołowych zawodników narciarstwa wysokogórskiego (ang. *ski mountaineering*, SKIMO), pomiary SmO_2 odzwierciedlając równowagę metaboliczną na niewielkim obszarze pracującego mięśnia, mogą być pomocnym narzędziem podczas treningu w warunkach wysokościowych. Dodatkowo należy podkreślić, że SmO_2 było w większym stopniu niezależne od wysokości niż HR, które często jest stosowane do monitorowania treningu (Hochachka i in., 2002; Koistinen i in., 1995). Zazwyczaj obserwuje się wzrost HR w hipoksji jako mechanizm kompensacji, co jest wynikiem niższej dostępności tlenu i konieczności utrzymania perfuzji tkanek (Engelen i in., 1996).

Podsumowując, badania własne wykazały, że bieżące wartości SmO_2 , których pomiar jest możliwy w warunkach terenowych, były jedynie w niewielkim stopniu zależne od wysokości, podczas gdy HR wykazywało mniejszą stabilność wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza (Rycina 10 i 11). To sprawia, że SmO_2 pomimo ograniczeń związanych z dużą indywidualną zmiennością może ułatwić kontrolę intensywności wysiłku, gdyż uwzględnia osobnicze odpowiedzi zawodników na trening w warunkach hipoksji. Nasze obserwacje potwierdziły wyniki badań innych autorów (Albertus-Cámara i in., 2024; Rodriguez i in., 2019; Solsona i in., 2022; Subudhi i in., 2007) wykorzystujących technologię NIRS, którzy również wskazywali, że SmO_2 może być mniej podatne na zmiany w warunkach hipoksji niż HR czy LA. Odmienne reakcje podczas wysiłku realizowanego z mocą odpowiadającą MLSS w różnych symulowanych warunkach wysokościowych w ostatnim czasie obserwowali inni autorzy (Beevera i in. 2024). Typowe wskaźniki intensywności, takie jak HR, wentylacja czy LA, pozostawały zbliżone, niezależnie od poziomu symulowanej wysokości.

Ostatnim istotnym, praktycznym aspektem podjętym w badaniach własnych (dane niepublikowane) była ocena dokładności estymacji stężenia mleczanu we krwi w oparciu o SmO_2 . Tak oszacowane stężenia LA obarczone były dużym błędem u kobiet i mężczyzn, co potwierdzały wartości wskaźnika R^2 zarówno u kobiet jak i mężczyzn (Rycina 12). Na

ogólną liczbę 174 pomiarów w 22 przypadkach błąd estymacji stężenia mleczanu przekraczał nawet dwukrotnie wartości zmierzone, a jedynie 15 przypadków charakteryzował błąd poniżej 10%. Był to czynnik, który uniemożliwił dokładne oszacowanie stężenia mleczanu we krwi z pomiarów deoksygenacji.

6. Wnioski

1. Pomiary utlenowania mięśni (SmO_2) stanowią użyteczne narzędzie w ocenie odpowiedzi wysiłkowej organizmu na wysiłki o stałej intensywności. Istotna jest nie tylko bieżąca wartość deoksygenacji mięśni lecz także analiza dynamiki zmian SmO_2 (przyrostu, obniżenia lub plateau) w kolejnych minutach wysiłku w celu weryfikacji założonego obciążenia treningowego (Publikacja 1).
2. Uzyskane wyniki wykazały małą wartość diagnostyczną wskaźnika THb do oceny odpowiedzi organizmu w teście MLSS (Publikacja 1).
3. Użyteczność pomiarów deoksygenacji mięśni do oceny wydolności beztlenowej u wytrenowanych zawodników jest niewielka, co wynika z braku istotnych korelacji pomiędzy wskaźnikami SmO_2 a wielkością mocy maksymalnej i pracy w teście Wingate (Publikacja 2).
4. Wielkość deoksygenacji mięśni podczas maksymalnego wysiłku w teście GXT nie wykazuje istotnych różnic międzypłciowych (Publikacja 2). Wyższy poziom wydolności fizycznej u łyżwiarek szybkich w porównaniu do studentek wpływa na istotnie większą deoksygenację mięśni zarówno na poziomie progu beztlenowego (AT_4 , mDmax i LT) jak i podczas wysiłku maksymalnego. Podobny kierunek zmian aczkolwiek nieistotny statystycznie, obserwowano także u łyżwiarzy szybkich i studentów (Publikacja 3).
5. Tempo reoksygenacji mięśni w fazie restytucji po maksymalnym wysiłku w teście GXT nie wykazuje istotnych różnic międzypłciowych (Publikacja 2 i 3).
6. Wyższa wydolność fizyczna określana przez VO_2max oraz maksymalną moc tlenową wiąże się z szybszym tempem reoksygenacji mięśni po wysiłku maksymalnym u wytrenowanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich (Publikacja 2 i 3).
7. W wysiłku maksymalnym wskaźniki utlenowania mięśni (SmO_2 Minimum i ΔSmO_2), jako lokalne parametry w obrębie mięśnia, nie są bezpośrednio związane z wielkością VO_2max ani z maksymalną mocą tlenową, które odzwierciedlają ogólnoustrojową, wysiłkową odpowiedź organizmu (Publikacja 2 i 3).
8. Wyznaczanie SmO_2 dla progów mleczanowych (próg tlenowy, mDmax , AT_4 i LT) może być pomocne w praktyce sportowej w doborze i kontroli realizacji obciążeń wysiłkowych podczas różnych programów treningowych (Publikacja 3).

9. Wyznaczona intensywność wysiłku w oparciu o wartości SmO_2 (zbliżona do progu beztlenowego), wykazała zgodność zarówno w warunkach normoksji jak i hipoksji normobarycznej (Publikacja 4).

10. Wskaźnik utlenowania mięśni (SmO_2) ma ograniczoną wartość w szacowaniu stężenia mleczanu we krwi podczas wysiłku przy wykorzystaniu obecnych technologii (rejestratora Moxy) (Dane niepublikowane).

7. Piśmiennictwo

- Albertus-Cámara, I., Paredes-Ruiz, M.-J., & Martínez-González-Moro, I. (2024). Analysis of Muscle Oxygenation after a Normobaric Hypoxia Tolerance Test. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/jfmk9020086>
- Beever, A. T., Zhuang, A. Y., Murias, J. M., Aboodarda, S. J., & MacInnis, M. J. (2024). Effects of acute simulated altitude on the maximal lactate steady state in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 327(2), R195–R207. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00065.2024>
- Biddulph, B., Morris, J. G., Lewis, M., Hunter, K., & Sunderland, C. (2023). Reliability of Near-Infrared Spectroscopy with and without Compression Tights during Exercise and Recovery Activities. *Sports*, 11(2), 23. <https://doi.org/10.3390/sports11020023>
- Blain, B., Schmit, C., Aubry, A., Hausswirth, C., Le Meur, Y., & Pessiglione, M. (2019). Neuro-computational Impact of Physical Training Overload on Economic Decision-Making. *Current Biology*, 29(19), 3289-3297.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.054>
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5), 377–381. <https://doi.org/10.1249/00005768-198209000-00012>.
- Borges, N. R., & Driller, M. W. (2016). Wearable Lactate Threshold Predicting Device is Valid and Reliable in Runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2212–2218. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001307>
- Born, D. P., Stöggl, T., Swarén, M., & Björklund, G. (2017). Near-infrared spectroscopy: More accurate than heart rate for monitoring intensity in running in hilly terrain. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(4), 440–447. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0101>
- Bourdillon, N., Mollard, P., Letournel, M., Beaudry, M., & Richalet, J.-P. (2009). Interaction between hypoxia and training on NIRS signal during exercise: Contribution of a mathematical model. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 169(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2009.08.011>
- Boushel, R., Langberg, H., Olesen, J., Gonzales-Alonzo, J., Bülow, J., & Kjær, M. (2001).

- Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 11(4), 213–222. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2001.110404.x>
- Cayot, T. E., Robinson, S. G., Davis, L. E., Bender, P. A., Thistlethwaite, J. R., Broeder, C. E., & Lauver, J. D. (2021). Estimating the Lactate Threshold Using Wireless Near-Infrared Spectroscopy and Threshold Detection Analyses. *International Journal of Exercise Science*, 14(4), 284–294. doi: 10.70252/HBRA1900
- Cettolo, V., Ferrari, M., Biasini, V., & Quaresima, V. (2007). Vastus lateralis O₂ desaturation in response to fast and short maximal contraction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(11), 1949–1959. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181453476>
- Champigneulle, B., Davranche, K., Brugniaux, J. V., Baillieux, S., Gajdos, T., Doutreleau, S., Robach, P., Bouzat, P., & Verges, S. (2022). Effect of a speed ascent to the top of Europe on cognitive function in elite climbers. *European Journal of Applied Physiology*, 122(3), 635–649. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04855-6>
- Chance, B., Dait, M. T., Zhang, C., Hamaoka, T., & Hagerman, F. (1992). Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 262(3), C766–C775. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1992.262.3.C766>
- Churchill, N. W., Hutchison, M. G., Di Battista, A. P., Graham, S. J., & Schweizer, T. A. (2017). Structural, Functional, and Metabolic Brain Markers Differentiate Collision versus Contact and Non-Contact Athletes. *Frontiers in Neurology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00390>
- Cohen, J. (2013). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Crum, E. M., O'Connor, W. J., Van Loo, L., Valckx, M., & Stannard, S. R. (2017). Validity and reliability of the Moxy oxygen monitor during incremental cycling exercise. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 1037–1043. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1330899>
- Dalamitros, A. A., Semaltianou, E., Toubekis, A. G., & Kabasakalis, A. (2021). Muscle

- Oxygenation, Heart Rate, and Blood Lactate Concentration During Submaximal and Maximal Interval Swimming. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3(December), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.759925>
- Dindorf, C., Bartaguiz, E., Dully, J., Sprenger, M., Becker, S., Fröhlich, M., & Ludwig, O. (2023). In Vivo Monitoring of Acute and Intermittent Fatigue in Sport Climbing Using Near-Infrared Spectroscopy Wearable Biosensors. *Sports*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/sports11020037>
- Driller, M., Borges, N., & Plews, D. (2016). Evaluating a new wearable lactate threshold sensor in recreational to highly trained cyclists. *Sports Engineering*, 19(4), 229–235. <https://doi.org/10.1007/s12283-016-0198-6>
- Driller, M., Plews, D., & Borges, N. (2016). Wearable near Infrared Sensor for Determining an Athlete's Lactate Threshold during Exercise. *NIR News*, 27(4), 8–10. <https://doi.org/10.1255/nirn.1609>
- Duc, S., Cassirame, J., & Durand, F. (2011). Physiology of ski mountaineering racing. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 856–863. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1279721>
- Engelen, M., Porszasz, J., Riley, M., Wasserman, K., Maehara, K., & Barstow, T. J. (1996). Effects of hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81(6), 2500–2508. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.6.2500>
- Faiss, R., Von Orelli, C., Dériaz, O., & Millet, G. P. (2014). Responses to exercise in normobaric hypoxia: Comparison of elite and recreational ski mountaineers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 978–984. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0524>
- Farzam, P., Starkweather, Z., & Franceschini, M. A. (2018). Validation of a novel wearable, wireless technology to estimate oxygen levels and lactate threshold power in the exercising muscle. *Physiological Reports*, 6(7). <https://doi.org/10.14814/phy2.13664>
- Feldmann, A., Ammann, L., Gächter, F., Zibung, M., & Erlacher, D. (2022). Muscle oxygen saturation breakpoints reflect ventilatory thresholds in both cycling and running. *Journal of Human Kinetics*, 83, 87–97. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0054>

- Feldmann, A. M., Erlacher, D., Pfister, S., & Lehmann, R. (2020). Muscle oxygen dynamics in elite climbers during finger-hang tests at varying intensities. *Scientific Reports*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60029-y>
- Ferrari, M., Muthalib, M., & Quaresima, V. (2011). The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: Recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1955), 4577–4590. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0230>
- Frikha, M., Chaâri, N., Gharbi, A., & Souissi, N. (2016). Influence of warm-up duration and recovery interval prior to exercise on anaerobic performance. *Biology of Sport*, 33(4), 361–366. <https://doi.org/10.5604/20831862.1221830>
- Gandia-Soriano, A., Salas-Montoro, J.-A., Javaloyes, A., Lorente-Casaus, C., Zabala, M., Priego-Quesada, J. I., & Mateo March, M. (2022). Validity and Reliability of Two Near-infrared Spectroscopy Devices to Measure Resting Hemoglobin in Elite Cyclists. *Int J Sports Med*, 43(10), 875–880.
- Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., Rojas-Valverde, D., de la Cruz Sánchez, E., García-Rubio, J., Ibáñez, S. J., & Pino-Ortega, J. (2020). Lower-limb Dynamics of Muscle Oxygen Saturation During the Back-squat Exercise: Effects of Training Load and Effort Level. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(5), 1227–1236. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003400>
- Grassi, B., & Quaresima, V. (2016). Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. *Journal of Biomedical Optics*, 21(9), 091313. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091313>
- Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C., Ferrari, M., & Cerretelli, P. (1999). Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87(1), 348–355. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.1.348>
- Hamaoka, T. (2013). Muscle oxygenation monitoring using near-infrared spectroscopy. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 2(2), 203–207. <https://doi.org/10.7600/jpfsm.2.203>
- Hamaoka, T., & McCully, K. K. (2019). Review of early development of near-infrared

- spectroscopy and recent advancement of studies on muscle oxygenation and oxidative metabolism. *Journal of Physiological Sciences*, 69(6), 799–811. <https://doi.org/10.1007/s12576-019-00697-2>
- Hamaoka, T., McCully, K. K., Niwayama, M., & Chance, B. (2011). The use of muscle near-infrared spectroscopy in sport, health and medical sciences: Recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1955), 4591–4604. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0298>
- Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mücke, S., Müller, R., & Hollmann, W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 6(03), 117–130. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025824>
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., Friedmann, B., & Schmidt, W. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *International Journal of Sports Medicine*, 22(7), 504–512. <https://doi.org/10.1055/s-2001-17613>
- Herold, F., Gronwald, T., Scholkmann, F., Zohdi, H., Wyser, D., Müller, N. G., & Hamacher, D. (2020). New Directions in Exercise Prescription: Is There a Role for Brain-Derived Parameters Obtained by Functional Near-Infrared Spectroscopy? *Brain Sciences*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/brainsci10060342>
- Hesford, C. M., Laing, S., Cardinale, M., & Cooper, C. E. (2013). Effect of race distance on muscle oxygenation in short-track speed skating. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(1), 83–92. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31826c58dd>
- Hettinga, F. J., Konings, M. J., & Cooper, C. E. (2016). Differences in muscle oxygenation, perceived fatigue and recovery between long-track and short-track speed skating. *Frontiers in Physiology*, 7(DEC). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00619>
- Hochachka, P. W., Beatty, C. L., Burelle, Y., Trump, M. E., McKenzie, D. C., & Matheson, G. O. (2002). The lactate paradox in human high-altitude physiological performance. *News in Physiological Sciences: An International Journal of Physiology Produced Jointly by the International Union of Physiological Sciences and the American Physiological Society*, 17, 122–126. <https://doi.org/10.1152/nips.01382.2001>
- Horiuchi, M., Nishida, A., Dobashi, S., & Koyama, K. (2022). Comparisons Between

- Normobaric Normoxic and Hypoxic Recovery on Post-exercise Hemodynamics After Sprint Interval Cycling in Hypoxia. *Frontiers in Physiology*, 13, 843574. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.843574>
- Ichimura, S., Murase, N., Osada, T., Kime, R., Homma, T., Ueda, C., Nagasawa, T., Motobe, M., Hamaoka, T., & Katsumura, T. (2006). Age and activity status affect muscle reoxygenation time after maximal cycling exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(7), 1277–1281. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000227312.08599.f1>
- Jamnick, N. A., Botella, J., Pyne, D. B., & Bishop, D. J. (2018). Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and [Formula: see text]. *PloS One*, 13(7), e0199794. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199794>
- Jones, B., Hamilton, D. K., & Cooper, C. E. (2015). Muscle oxygen changes following sprint interval cycling training in elite field hockey players. *PLoS ONE*, 10(3), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120338>
- Jones, B., Parry, D., & Cooper, C. E. (2018). Underwater near-infrared spectroscopy can measure training adaptations in adolescent swimmers. *PeerJ*, 2018(4), 1–24. <https://doi.org/10.7717/peerj.4393>
- Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., & Pogliaghi, S. (2015). Exercise Intensity Thresholds: Identifying the Boundaries of Sustainable Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(9), 1932–1940. <https://doi.org/10.1249/MSS.00000000000000613>
- Keir, D. A., Iannetta, D., Mattioni Maturana, F., Kowalchuk, J. M., & Murias, J. M. (2022). Identification of Non-Invasive Exercise Thresholds: Methods, Strategies, and an Online App. *Sports Medicine*, 52(2), 237–255. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01581-z>
- Klusiewicz, A., Starczewski, M., Ładyga, M., Długolecka, B., Braksator, W., Mamcarz, A., & Sitkowski, D. (2014). Reference values of maximal oxygen uptake for Polish rowers. *Journal of Human Kinetics*, 44, 121.
- Kodejška, J., Michailov, M. L., & Baláš, J. (2016). Forearm muscle oxygenation during sustained isometric contractions in rock climbers. *Auc Kineanthropologica*, 51(2), 48–55. <https://doi.org/10.14712/23366052.2015.31>

- Koistinen, P., Takala, T., Martikkala, V., & Leppäluoto, J. (1995). Aerobic fitness influences the response of maximal oxygen uptake and lactate threshold in acute hypobaric hypoxia. *International Journal of Sports Medicine*, 16(2), 78–81. <https://doi.org/10.1055/s-2007-972968>
- Lasshofer, M., Seifert, J., Wörndle, A. M., & Stöggl, T. (2021). Physiological responses and predictors of performance in a simulated competitive Ski mountaineering race. *Journal of Sports Science and Medicine*, 20(2), 250–257. <https://doi.org/10.52082/jssm.2021.250>
- Macfarlane, D. J., & Wong, P. (2012). Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system. *European Journal of Applied Physiology*, 112(7), 2539–2547.
- Malczewska-Lenczowska, J., Sitkowski, D., Orysiak, J., Pokrywka, A., & Szygula, Z. (2013). Total haemoglobin mass, blood volume and morphological indices among athletes from different sport disciplines. *Archives of Medical Science : AMS*, 9(5), 780–787. <https://doi.org/10.5114/aoms.2013.36926>
- Marriott, H. E., & Lamb, K. L. (1996). The use of ratings of perceived exertion for regulating exercise levels in rowing ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 72(3), 267–271. <https://doi.org/10.1007/BF00838093>
- McCully, K. K., & Hamaoka, T. (2000). Near-infrared spectroscopy: What can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28(3), 123–127. <https://doi.org/10.1097/00003677-200007000-00007>
- McManus, C. J., Collison, J., & Cooper, C. E. (2018). Performance comparison of the MOXY and PortaMon near-infrared spectroscopy muscle oximeters at rest and during exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 23(01), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.23.1.015007>
- McMorries, R. M., Joubert, D. P., Jones, E. J., & Faries, M. D. (2019). A Validation Study of a Noninvasive Lactate Threshold Device. *International Journal of Exercise Science*, 12(2), 221–232. <https://www.intjexersci.com/2019/12/2/221/>
- Mehmet Topal, Serdar Orkun Pelvan, & Savas Akbas. (2023). The Effects of Performances in Canoe, Kayak and Rowing on Muscle Oxygen Saturation: Experimental Study.

- Miranda-Fuentes, C., Chirisa-Ríos, L. J., Guisado-Requena, I. M., Delgado-Floody, P., & Jerez-Mayorga, D. (2021). Changes in muscle oxygen saturation measured using wireless near-infrared spectroscopy in resistance training: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph18084293>
- Neary, J. P. (2004). Application of near infrared spectroscopy to exercise sports science. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 29(4), 488–503. <https://doi.org/10.1139/h04-032>
- Neary, J. P., McKenzie, D. C., & Bhambhani, Y. N. (2002). Effects of short-term endurance training on muscle deoxygenation trends using NIRS. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(11), 1725–1732. <https://doi.org/10.1097/00005768-200211000-00006>
- Obmiński, Z., Borkowski, L., Szczepańska, B., & Zdanowicz, R. (2016). Anaerobic ability in juvenile male Free-and Greco-Roman style wrestlers. *Journal of Combat Sports & Martial Arts*, 7(1).
- Okushima, D., Poole, D. C., Barstow, T. J., Rossiter, H. B., Kondo, N., Bowen, T. S., Amano, T., & Koga, S. (2016). Greater VO₂peak is correlated with greater skeletal muscle deoxygenation amplitude and hemoglobin concentration within individual muscles during ramp-incremental cycle exercise. *Physiological Reports*, 4(23), 1–12. <https://doi.org/10.14814/phy2.13065>
- Olcina, G., Perez-Sousa, M. Á., Escobar-Alvarez, J. A., & Timón, R. (2019). Effects of cycling on subsequent running performance, stride length, and muscle oxygen saturation in triathletes. *Sports*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/sports7050115>
- Paquette, M., Bieuzen, F., & Billaut, F. (2018). Muscle oxygenation rather than VO₂max as a strong predictor of performance in sprint canoe-Kayak. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(10), 1299–1307. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0077>
- Paquette, M., Bieuzen, F., & Billaut, F. (2019). Sustained Muscle Deoxygenation vs. Sustained High VO₂ During High-Intensity Interval Training in Sprint Canoe-Kayak.

- Frontiers in Sports and Active Living*, 1(July), 1–9.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00006>
- Paquette, M., Bieuzen, F., & Billaut, F. (2020). Effect of a 3-Weeks Training Camp on Muscle Oxygenation, $\dot{V}O_2$ and Performance in Elite Sprint Kayakers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2(April), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00047>
- Paquette, M., Bieuzen, F., & Billaut, F. (2021). The effect of HIIT vs. SIT on muscle oxygenation in trained sprint kayakers. *European Journal of Applied Physiology*, 121(10), 2743–2759. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04743-z>
- Pereira, M. I. R., Gomes, P. S. C., & Bhambhani, Y. N. (2007). A brief review of the use of near infrared spectroscopy with particular interest in resistance exercise. *Sports Medicine*, 37(7), 615–624. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737070-00005>
- Perrey, S. (2013). Promoting Motor Function by Exercising the Brain. *Brain Sciences*, 3(1), 101–122. <https://doi.org/10.3390/brainsci3010101>
- Perrey, S. (2022a). Evaluating brain functioning with NIRS in sports: Cerebral oxygenation and cortical activation are two sides of the same coin. *Frontiers in Neuroergonomics*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnrgo.2022.1022924>
- Perrey, S. (2022b). Muscle Oxygenation Unlocks the Secrets of Physiological Responses to Exercise: Time to Exploit it in the Training Monitoring. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4(March), 864825. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.864825>
- Perrey, S., & Ferrari, M. (2018). Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 48(3), 597–616. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
- Perrey, S., Quaresima, V., & Ferrari, M. (2024). Muscle Oximetry in Sports Science: An Updated Systematic Review. *Sports Medicine*, 54(4), 975–996. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01987-x>
- Quaresima, V., Lepanto, R., & Ferrari, M. (2003). The use of near infrared spectroscopy in sports medicine. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(1), 1–13.
- Raleigh, C., Donne, B., & Fleming, N. (2018). Association between different Non-Invasively Derived Thresholds with Lactate Threshold during graded incremental exercise. *International Journal of Exercise Science*, 11(4), 391–403.

- Rodrigo-Carranza, V., González-Mohino, F., Turner, A. P., Rodriguez-Barbero, S., & González-Ravé, J. M. (2021). Using a Portable Near-infrared Spectroscopy Device to Estimate the Second Ventilatory Threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 42(10), 905–910. <https://doi.org/10.1055/a-1343-2127>
- Rodriguez, R. F., Townsend, N. E., Aughey, R. J., & Billaut, F. (2019). Respiratory muscle oxygenation is not impacted by hypoxia during repeated-sprint exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 260, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2018.11.006>
- Rupp, T., Saugy, J. J., Bourdillon, N., Verges, S., & Millet, G. P. (2019). Positive expiratory pressure improves arterial and cerebral oxygenation in acute normobaric and hypobaric hypoxia. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 317(5), R754–R762. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00025.2019>
- Sanders, D., Taylor, R. J., Myers, T., & Akubat, I. (2020). A Field-Based Cycling Test to Assess Predictors of Endurance Performance and Establishing Training Zones. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(12), 3482–3488. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001910>
- Snyder, A. C., & Parmenter, M. A. (2009). Using Near-Infrared Spectroscopy to Determine Maximal Steady State Exercise Intensity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1833–1840. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ad3362>
- Solsona, R., Deriaz, R., Borrani, F., & Sanchez, A. M. J. (2022). Muscle Deoxygenation Rates and Reoxygenation Modeling During a Sprint Interval Training Exercise Performed Under Different Hypoxic Conditions. *Frontiers in Physiology*, 13, 864642. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.864642>
- Spencer, M. D., Murias, J. M., & Paterson, D. H. (2012). Characterizing the profile of muscle deoxygenation during ramp incremental exercise in young men. *European Journal of Applied Physiology*, 112(9), 3349–3360. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2323-y>
- Steiner, T., Maier, T., & Wehrlin, J. P. (2019). Effect of Endurance Training on Hemoglobin Mass and V'O₂max in Male Adolescent Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(5), 912–919. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001867>
- Stöcker, F., Oldershausen, C. Von, Paternoster, F. K., Schulz, T., & Oberhoffer, R. (2016). Relationship of post-exercise muscle oxygenation and duration of cycling exercise.

- BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 8(1), 1–11.
<https://doi.org/10.1186/s13102-016-0036-y>
- Stöcker, F., Von Oldershausen, C., Paternoster, F. K., Schulz, T., & Oberhoffer, R. (2017). End-exercise $\Delta\text{HHb}/\Delta\text{VO}_2$ and post-exercise local oxygen availability in relation to exercise intensity. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 37(4), 384–393.
<https://doi.org/10.1111/cpf.12314>
- Subudhi, A. W., Dimmen, A. C., & Roach, R. C. (2007). Effects of acute hypoxia on cerebral and muscle oxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 103(1), 177–183. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01460.2006>
- Tiberini, P., D’Antona, G., & Cicchella, A. (2021). Brain Oxygenation in Post-concussion Combat Sport Athletes. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3(November), 1–7.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2021.725096>
- Van Der Zwaard, S., Jaspers, R. T., Blokland, I. J., Achterberg, C., Visser, J. M., Den Uil, A. R., Hofmijster, M. J., Levels, K., Noordhof, D. A., De Haan, A., De Koning, J. J., Van Der Laarse, W. J., & De Ruiter, C. J. (2016). Oxygenation threshold derived from near- Infrared spectroscopy: Reliability and its relationship with the first ventilatory threshold. *PLoS ONE*, 11(9), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162914>
- van Hooff, M., Arnold, J., Meijer, E., Schreuder, P., Regis, M., Xu, L., Scheltinga, M., Savelberg, H., & Schep, G. (2022). Diagnosing Sport-Related Flow Limitations in the Iliac Arteries Using Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Clinical Medicine*, 11(24).
<https://doi.org/10.3390/jcm11247462>
- Vasquez-Bonilla, A. A., González-Custodio, A., Timón, R., & Olcina, G. (2022). A proposal to identify the maximal metabolic steady state by muscle oxygenation and $\text{VO}_{2\text{max}}$ levels in trained cyclists. *Sport Sciences for Health*, 0123456789.
<https://doi.org/10.1007/s11332-022-00985-2>
- Wang, B., Xu, G., Tian, Q., Sun, J., Sun, B., Zhang, L., Luo, Q., & Gong, H. (2012). Differences between the vastus lateralis and gastrocnemius lateralis in the assessment ability of breakpoints of muscle oxygenation for aerobic capacity indices during an incremental cycling exercise. *Journal of Sports Science and Medicine*, 11(4), 606–613.
- Xu, F., & Rhodes, E. C. (1999). Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Medicine*

(Auckland, N.Z.), 27(5), 313–327. <https://doi.org/10.2165/00007256-199927050-00003>

Xu, G., Mao, Z., Ye, Y., & Lv, K. (2011). Relationship between muscle oxygenation by NIRS and blood lactate. *Journal of Physics: Conference Series*, 277(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/277/1/012042>

Zelenkova, I. E., Zotkin, S. V, Korneev, P. V, Koprov, S. V, & Grushin, A. A. (2019). Relationship between total hemoglobin mass and competitive performance in endurance athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(3), 352–356. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.07865-9>

8. Spis tabel i rycin

Tabela 1. Moc średnia, stężenie mleczanu we krwi (LA), częstość skurczów serca (HR), utlenowanie mięśnia obszernego bocznego (SmO_2), całkowita hemoglobina (THb) i subiektywna ocena wysiłku w skali Borga (RPE) zarejestrowane podczas 30 min testu (MLSS) u badanych wioślarzy ($n=8$), średnia $\pm$ SD. 34

Tabela 2. Wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu Wingate u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, średnia $\pm$ SD. 36

Tabela 3. Wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu o stopniowanej intensywności u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich, średnia $\pm$ SD. 36

Tabela 4. Wartości współczynników korelacji Spearmana między maksymalnym poborem tlenu ($\text{VO}_{2\text{max}}$) oraz pikiem mocy (P_{peak}) z testu o stopniowanej intensywności a wybranymi wskaźnikami utlenowania mięśnia obszernego bocznego (SmO_2) zarejestrowanymi podczas testu Wingate i testu GXT u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich ($n=27$). W nawiasach przedstawiono przedział wartości dla współczynnika korelacji. 37

Tabela 5. Wartości współczynników korelacji Spearmana pomiędzy wybranymi wskaźnikami zarejestrowanymi podczas testu Wingate u badanych łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich ($n=27$). W nawiasach przedstawiono przedział wartości dla współczynnika korelacji. 38

Tabela 6. Maksymalne wartości wybranych wskaźników zarejestrowanych podczas testu o stopniowanej intensywności w badanych grupach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich ($n=27$) oraz studentek i studentów ($n=29$), średnia $\pm$ SD. 40

Tabela 7. wartości wybranych wskaźników wyznaczonych dla progu tlenowego i progów beztlenowych w badanych grupach łyżwiarek i łyżwiarzy szybkich (n=27) oraz studentek i studentów (n=29), średnia±SD..... 41

Rycina 1. Metoda wyznaczania czasu niezbędnego do powrotu do 50% maksymalnej wartości utlenowania mięśnia podczas restytucji (HTR) po teście o stopniowanej intensywności u jednego z badanych studentów, według metody Nagasawy (2013). 32

Rycina 2. Wartości utlenowania mięśnia obszernego bocznego (SmO_2) podczas testu 30 min (MLSS) na ergometrze wioślarskim u badanych wioślarzy (n=8). 35

Rycina 3. Utlenowanie mięśnia obszernego bocznego (SmO_2): w spoczynku i minimalna wartość wysiłkowa, różnica między spoczynkową i minimalną wysiłkową wartością (ΔSmO_2) oraz połowa czasu potrzebna do powrotu SmO_2 do poziomu spoczynkowego ($\text{SmO}_2 \text{ HTR}$). 39

Rycina 4. Utlenowanie mięśni na poziomie progu tlenowego (AT_2) i trzech progów beztlenowych (AT_4 , mDmax , LT) wyrażonych jako Δ (SmO_2 spoczynkowe minus SmO_2 progowe) w grupie studentek i łyżwiarek, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$). 42

Rycina 5. Utlenowanie mięśni na poziomie progu tlenowego (AT_2) i trzech progów beztlenowych (AT_4 , mDmax , LT) wyrażonych jako Δ (SmO_2 spoczynkowe minus SmO_2 progowe) w grupie łyżwiarzy i studentów. 42

Rycina 6. Utlenowanie mięśni (SmO_2): w spoczynku, wartości minimalne, a także różnica pomiędzy wartością spoczynkową a minimalną (Δ) oraz maksymalne wartości w okresie restytucji podczas testu o stopniowanej intensywności u studentek i łyżwiarek, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) między studentkami i łyżwiarkami. 43

Rycina 7. Utlenowanie mięśni (SmO_2): w spoczynku, wartości minimalne, różnica pomiędzy wartością spoczynkową a minimalną (Δ) oraz maksymalne wartości w okresie restytucji podczas testu o stopniowanej intensywności u studentów i łyżwiarzy, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) pomiędzy studentami i łyżwiarzami. 44

Rycina 8. Połowa czasu powrotu utlenowania mięśni do poziomu spoczynkowego ($\text{SmO}_{2\text{HTR}}$) w badanych grupach studentek i łyżwiarek szybkich oraz studentów i łyżwiarzy szybkich. 44

Rycina 9. Tempo reoksygenacji utlenowania mięśni (SmO_2) w grupach studentów i łyżwiarzy, * - różnica istotna statystycznie ($p < 0,05$) między studentkami i łyżwiarkami. 45

Rycina 10. Wykres Blanda–Altmana przedstawiający zgodność pomiędzy stężeniem mleczanu we krwi (LA) na progu beztlenowym (AT₄) w normoksji, a średnimi wartościami podczas testu MLSS w hipoksji, odpowiadającymi równoważnym wartościom SmO₂. 46

Rycina 11. Wykres Blanda–Altmana przedstawiający zgodność pomiędzy częstością skurczów serca (HR) na progu beztlenowym (AT₄) w warunkach normoksji, a średnimi wartościami podczas testu MLSS w warunkach hipoksji, odpowiadającymi równoważnym wartościom SmO₂. 46

Rycina 12. Zależność pomiędzy stężeniem mleczanu we krwi a utlenowaniem mięśnia obszernego bocznego wyrażonego jako Δ (różnica między SmO₂ spoczynkowym i wysiłkowym) podczas testu o stopniowanej intensywności w grupach kobiet n=25 (A) i mężczyzn n=30 (B), uwzględniono jedynie pełne 3 minutowe wysiłki..... 47

The use of muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the aerobic training loads of world-class rowers

AUTHORS: Andrzej Klusiewicz¹, Kinga Rębiś², Mariusz Ozimek², Adam Czaplicki¹

¹ Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Faculty of Physical Education and Health, Biała Podlaska, Poland

² Institute of Sport – National Research Institute in Warsaw, Department of Physiology, Poland

ABSTRACT: The objectives of this study were (1) to characterize the changes in oxygenation derived from muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) during aerobic constant-load exercise with intensities close to Maximal Lactate Steady-State (MLSS) and (2) to establish reference values in the world-class rowers, for such workload often included in rowing training programs. Eight senior world-class rowers performed an incremental progressive submaximal exercise test and a 30-minute test on a rowing ergometer. The power corresponding to intensive aerobic training ($84 \pm 1\%$ of the anaerobic threshold) was adopted as an exercise load in the 30-minute test. The NIRS device was fixed on the vastus lateralis muscle which was active during rowing to record muscle O_2 saturation (SmO_2) and total hemoglobin concentration (THb) at rest and during exercise. Statistically significant increments in blood lactate (LA) and heart rate (HR) were observed, with 1.18 ± 0.61 mmol/l and 10 ± 5 beats/min, respectively, in 30th minute compared to 10th minute in 30-minute test. SmO_2 decreased significantly by $2.9 \pm 1.4\%$, whereas THb did not change. The examinations may suggested the low diagnostic value of THb in constant-load exercise. In each subject, SmO_2 was gradually reduced during the intense aerobic exercise. During workload close to MLSS, the SmO_2 of the vastus lateralis ranged from 14.0 ± 3.13 to $11.1 \pm 2.81\%$ in 10 and 30 minutes respectively, with a reduction in muscle oxygenation (ΔSmO_2) exceeding 50%. The non-invasive nature of the NIRS measurement and the continuous monitoring of SmO_2 values are useful in the practice of monitoring training in terms of aerobic training loads.

CITATION: Klusiewicz A, Rębiś K, Ozimek M, Czaplicki A. The use of muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the aerobic training loads of world-class rowers. *Biol Sport.* 2021;38(4):713–719.

Received: 2021-01-05; Reviewed: 2021-01-13; Re-submitted: 2021-01-13; Accepted: 2021-04-28; Published: 2021-05-20.

Corresponding author:

Andrzej Klusiewicz

tel.: (+4822) 569-99-68

E-mail: andrzej.klusiewicz@insp.waw.pl

ORCID:

Andrzej Klusiewicz

0000-0002-1866-9998

Kinga Rębiś

0000-0002-1884-5816

Mariusz Ozimek

0000-0002-9282-5725

Adam Czaplicki

0000-0003-2816-099X

Key words:

Elite rowers

NIRS

Intensive aerobic training load

INTRODUCTION

For many years, the most common indicator used to evaluate the general physical capacity and sports performance of rowers has been maximal oxygen uptake (VO_{2max}) [1]. However, the methods of direct determination of VO_{2max} involve substantial costs of measuring equipment and participation of qualified staff to carry out exercise tests. Furthermore, they require high motivation of the participant to perform the maximum exercise.

Other indicators used to evaluate physical capacity and monitor training are blood lactate (LA) measurements and recording heart rate (HR). LA measurements require capillary blood to be collected, which, due to the need to ensure the comfort of competitors, leads to a limited frequency of collection. Recording heart rate (HR) during training and competitions provides the material for the analysis of the athlete's response to exercise. Although this method has been commonly used to monitor training load, it should be stressed that in addition to the unquestionable usefulness (especially in endurance sports), it also has some limitations. Training practice has shown relatively low usefulness of HR measurements in strength training or interval training, or, according to Born et al. [2], in training in

naturally hilly terrain (uphill and downhill sections). Furthermore, HR depends on many factors related to e.g. emotional state, degree of rest and hydration of the person, and environmental conditions (temperature, humidity, time of day, altitude, etc.). One of the main limitations of HR monitoring in elite athletes is the low sensitivity of heart rate (HR) response to exercise loading in fit individuals due to cardiac muscle development and adaptations. Moreover, analysis reveals that maximum heart rate can be altered by 3 to 7% with aerobic training/detraining [3].

In the last few years, portable measuring devices have been introduced into training practice, using near-infrared spectroscopy (NIRS) to evaluate myoglobin oxygen saturation in muscle cytoplasm and haemoglobin in blood vessels of muscle microcirculation (muscle oxygen saturation, SmO_2) [4]. Monitoring of oxygen saturation in muscles provides real-time information about both local muscle oxygen delivery and utilization during exercise or work. This is a local measurement, during which, as demonstrated by Paquette et al. [5], there are significant differences in muscle oxygen saturation in a given test exercise depending on the location of the NIRS device. The

first scientific studies using NIRS in athletes (trained rowers) were published in 1992 [6], but it was the implementation of portable wireless muscle oximeters to measure muscle oxygen saturation in 2006 that stimulated the rapid development of this measurement method. According to many authors, NIRS measurements represent a simple, safe, and fast way to evaluate exercise capacity during short-term maximum contractions [7] and to determine the so-called training intensity zones [8–10]. Furthermore, modern oximeters allow the measurements in the sport competition settings in athletes of various sports such as skaters [11], canoeists, and kayaking [5].

Devices for muscle oxygen saturation measurement have a built-in memory that allows for recording training parameters and offer non-invasive measurement, wireless connectivity (e.g. with HR recorders or smartphones), small size and waterproofness, high sampling rate and an affordable price that encourage coaches to implement them in their coaching practice. While the HR and oxygen uptake responses are characterized by a certain lag, the tissue oxygenation index (TOI) provides faster feedback [2]. Particularly interesting are the recent findings [5] which showed that monitoring of muscle oxygen saturation in canoeists and kayakers can be particularly important as a predictor of sports performance. There are few such studies, and therefore the need arises to assess the usefulness of muscle oxygen saturation measurements for monitoring training loads in other sports. It is worth adding that, according to the oximeter manufacturers, they can be used to evaluate the effects of exercise intensity and training duration on muscle oxygenation and recovery rates. In training practice, elite Polish rowers are often exposed to training loads with a power close to the maximal lactate steady state (MLSS), with their intensity verified with blood lactate measurements. Taking into account the non-invasive nature and practical usefulness of NIRS measurements, the present study attempted to verify such a training load using this method. To the best of our knowledge, few authors [12–14] have dealt with this kind of problem to date. Therefore, the objectives of this study were (1) to characterize the changes in oxygenation derived from muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) during aerobic constant-load exercise with intensities close to maximal lactate steady-state (MLSS) and (2) to establish reference values in world-class rowers, for such workloads are often included in rowing training programmes.

MATERIALS AND METHODS

Subjects

Eight world-class rowers participated in the research. They were elite athletes from the Polish National Team (including 2 lightweight athletes) preparing to compete in the World Championship. All the rowers studied were medal winners of world and European championships or finalists of the European championships and the World Cup. The basic characteristics of the participants are presented in Table 1.

The research was carried out during the competition period (in July 2019) before the World Rowing Championships after obtaining

TABLE 1. Basic characteristics of the examined rowers (n = 8).

Variable/Group	Mean $\pm$ SD
Age (years)	29.2 $\pm$ 4.7
Body height (cm)	195 $\pm$ 3.9
Body weight (kg)	89.5 $\pm$ 10.0
BMI (kg/m ²)	23.5 $\pm$ 2.8
Training experience (years)	15.1 $\pm$ 4.9

the consent of the Scientific Research Ethics Committee of the Institute of Sport – National Research Institute.

Exercise tests

The rowers performed two submaximal exercise tests: the progressive exercise test and the 30-minute test on a Concept 2 rowing ergometer (Morrisville, USA). The progressive test was performed first to determine the anaerobic threshold for a lactate concentration of 4 mmol/l (AT4). This test is routinely used by Polish rowers and consists of an incremental workload of 3 minutes, separated by a 30-second rest for blood sampling [1].

Within 2 to 5 days after the progressive test, the rowers performed 30-minute submaximal exercise (30-minute test) at constant power and a constant individual stroke rate. This exercise was divided into three 10-minute intervals, followed by a 1-minute rest for blood sampling. The test was preceded by a 5-minute warm-up with an intensity corresponding to a heart rate of 130 beats/min. The rest between the warm-up and the main exercise load was 2 minutes. The main exercise load was assumed to be $84 \pm 1\%$ of the previously determined anaerobic threshold (AT4). According to our research [15], the exercise load adopted using this method in rowers is slightly lower than the maximal lactate steady state (MLSS). MLSS was defined as in the study by Heck *et al.* [16] as the highest concentration of blood lactate that does not rise above 1.0 mmol/l during the last 20 minutes of constant-power exercise. The test is often used in the training practice of Polish rowers at different sports skill levels as a load corresponding to high-intensity aerobic training in a state of relative equilibrium between lactate production and utilization.

Blood samples were obtained from the earlobe at rest and immediately after each test effort to determine the lactate concentration (LA) using the Super GL 2 analyser (Dr Müller, Germany). In the progressive test, the number of blood samples depended on the rower's physical capacity, i.e. the number of exercise steps, and was different for each athlete. In the 30-minute test, 4 blood samples were taken (at rest and immediately after each 10-min time interval). During testing, the heart rate (HR) was also continuously recorded by means of a Polar S610i heart monitor by Polar Electro Oy (Finland).

Measurements of muscle oxygenation

During the 30-minute test, an NIRS device (Moxxy monitors; Fortiori Design LLC, Hutchinson, MN, USA) was placed on the vastus

lateralis (VL) muscle that is active during rowing, see Figure 1. Moxly is a continuous wave. It uses a new type of algorithm that is based on Monte Carlo modelling. The system uses 4 wavelengths at 680, 720, 760, and 800 nm. It has 2 emitters to detector spacings at 12.5 and 25 mm.

The device was approximately 15 cm above the proximal border of the patella and was fixed to the right limb with dark 7.5 cm dynamic tape. Two indices were recorded both at rest and during exercise: muscle oxygen saturation (SmO_2) and total haemoglobin (THb). SmO_2 reflects the dynamic balance between oxygen (O_2) consumption and supply, while THb is an indicator of local blood volume (relative change in blood volume) [17]. The analysis of the results used mean NIRS measurements for 1.0 minute at rest and 10, 20, and 30 minutes of exercise. The differences in SmO_2 (Δ) between resting and exercise levels were also calculated.

Rating of perceived exertion

In the research, the Borg scale was used to assess the level of exercise intensity. The scale was made up of grades from 6 to 20 (6–20 interval) [18], which was previously used also in a study of rowers [19]. During the test, the Borg scale was placed in front of the athletes and the assessment was made at the end of each 10-minute section of exercise and at the end of the 30-minute test.

Statistical analysis

The statistical analysis was carried out using STATISTICA 12 (StatSoft, Poland). First, the data were tested for normality of distribution and homogeneity of variances using the Shapiro-Wilk test and Bartlett's test. The results confirmed that the data were normally distributed and that the variances were homogeneous. We performed a one-way ANOVA for the LA, HR, SmO_2 and THb scores. Mauchly's test was applied prior to the interpretation of the results of each analysis. If the results of the test were negative, the correctness of the calculations was also verified by means of multivariate analysis (Wilk's λ), which is not sensitive to violations of the sphericity assumption. In the final stage of the statistical analysis, we applied Tukey's test, which allowed for a detailed interpretation of significant differences between the mean values of the variables. We estimated effect size using partial eta squared (η_p^2), which was interpreted as follows: $0.01 < \eta_p^2 \leq 0.09$ – small effect size, $0.09 < \eta_p^2 \leq 0.25$ – medium effect size, and $\eta_p^2 > 0.25$ – large effect size [20].

The Borg rating for perceived exertion scale (RPE) was additionally used for subjective evaluation of the physical effort. The responses of the subjects were analysed by means of Friedman's ANOVA. In all the tests used the statistical significance was set at $p < 0.05$.

RESULTS

The resting value of SmO_2 was $65.5 \pm 1.9\%$, while that of THb was 13.054 ± 0.093 g/dl. During the 30-minute submaximal workload, statistically significant increments in LA concentration and HR were



FIG 1. Typically used location of the NIRS recorder on the vastus lateralis muscle.

observed, amounting to 1.18 ± 0.61 mmol/l and 10 ± 5 beats/min, respectively, in 30 min compared to 10 min. Furthermore, SmO_2 decreased significantly by $2.9 \pm 1.4\%$, while THb did not change; see Table 2. The drop of SmO_2 during 30 minutes of the test was observed in the first minute of each 10-minute interval. There was a 1-minute break between each period.

In all cases, as the duration of the exercise increased, SmO_2 was gradually decreasing; see Figure 2 and Figure 3. All identified statistically significant differences also turned out to be large, as the values of the partial eta squared ranged from 0.64 (SmO_2) to 0.83 (HR).

TABLE 2. Mean power, blood lactate concentration (LA), heart rate (HR), oxygenation of the vastus lateralis (SmO₂), total haemoglobin concentration (THb) values and rating of perceived exertion (RPE) recorded during the 30 min test in the examined rowers (n = 8).

Variable/Time	10 min (Mean ± SE)	20 min (Mean ± SE)	30 min (Mean ± SE)
Mean power (W)	320.4 ± 11.7	321.1 ± 11.9	321.5 ± 12.0
LA (mmol/l)	2.33 ± 0.30 ^{2,3}	2.98 ± 0.40 ^{1,3}	3.51 ± 0.49 ^{1,2}
HR (beats/min)	158.8 ± 3.2 ^{2,3}	164.4 ± 3.5 ^{1,3}	169.0 ± 3.4 ^{1,2}
SmO ₂ (%) ^A	14.0 ± 3.1 ³	12.6 ± 3.2 ³	11.1 ± 2.8 ^{1,2}
ΔSmO ₂ (%) ^B	51.5 ± 2.7 ³	52.9 ± 3.1 ³	54.4 ± 2.6 ^{1,2}
THb (g/dl) ^C	13.073 ± 0.084	13.068 ± 0.085	13.074 ± 0.082
RPE (6–20)	12.7 ± 0.5	13.6 ± 0.8	14.1 ± 1.0

The upper index in a given row indicates a measurement with a significantly different mean ($p < 0.05$). ΔSmO₂ – % of baseline. A – values “on line” from the recorder, B – reduction in oxygenation, C – non-significant differences ($p < 0.51$).

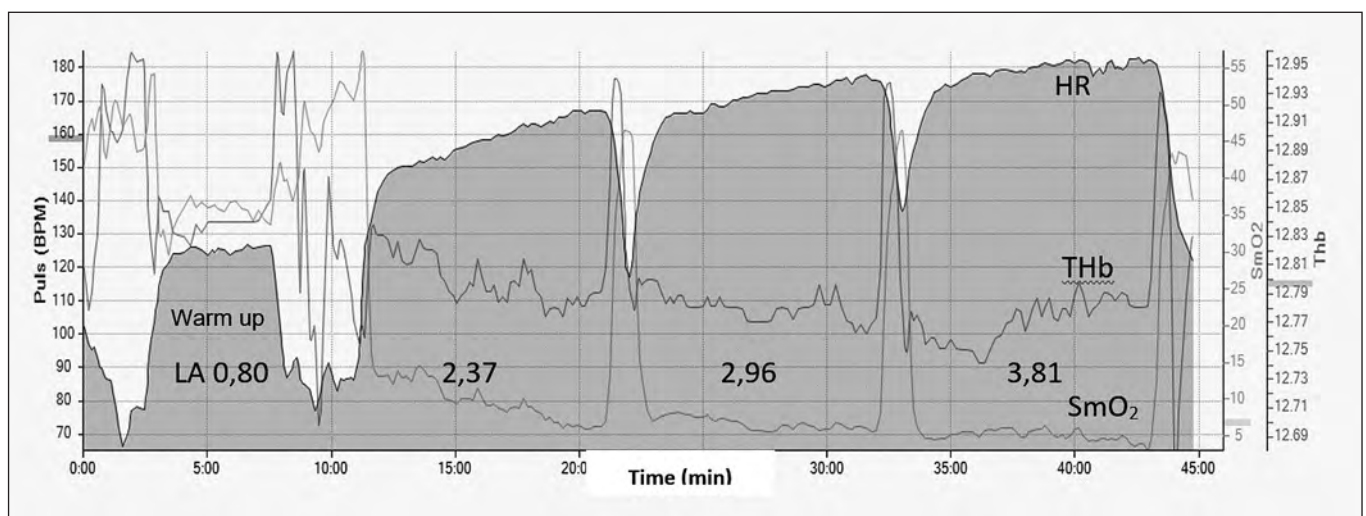


FIG. 2. Individual recording of vastus lateralis muscle oxygenation (SmO₂) with blood lactate (LA), total haemoglobin (THb) and heart rate (HR) in rowers during the 30-minute test on a rowing ergometer (SmO₂: lower record, THb: middle record and HR: upper record).

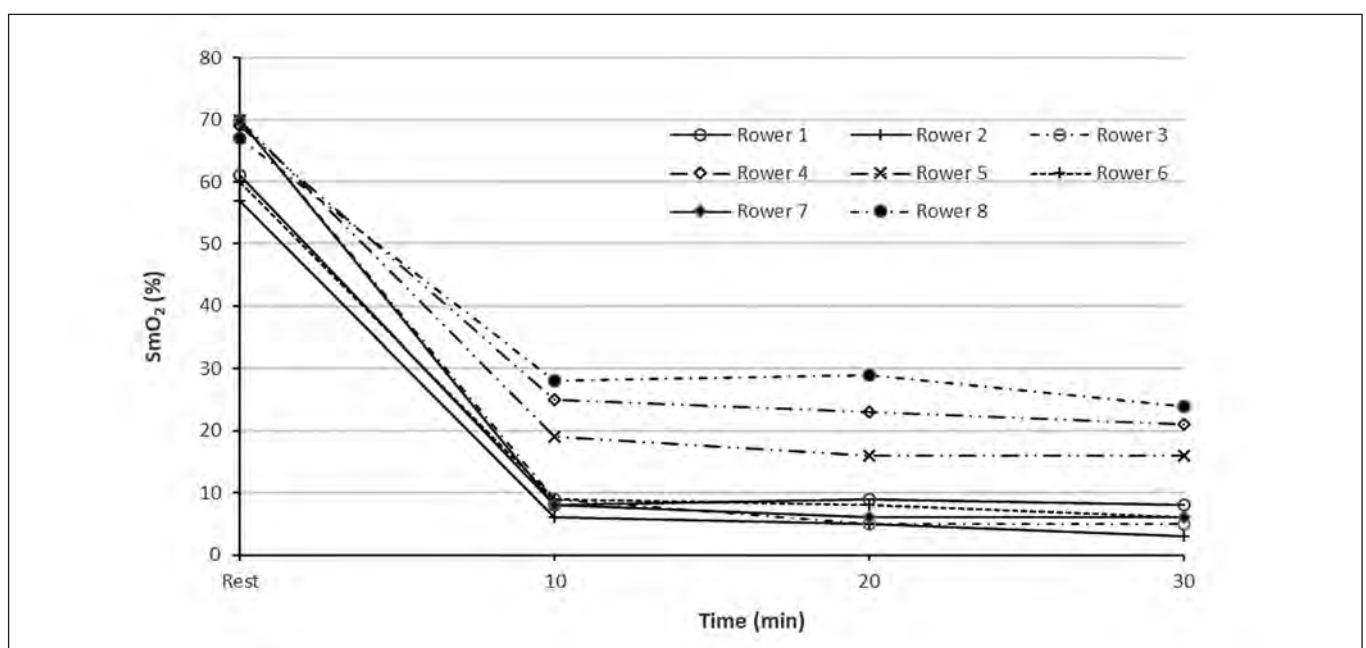


FIG. 3. Individual values of vastus lateralis muscle oxygenation (SmO₂) during the 30-minute test on a rowing ergometer in the examined rowers (n=8).

The highest muscle oxygenation (SmO_2) in rowers 8 and 4 presented in Figure 3 was accompanied by the lowest blood lactate concentrations in the examined group (1.65 and 3.09 mmol/l in 30 minutes of exercise, respectively), while in rower 5, the lactate concentration was 4.20 mmol/l. The results of Friedman's ANOVA did not show statistically significant differences ($p < 0.11$) in the rating of perceived exertion depending on the stage of the trial; see Table 2.

DISCUSSION

In the present study of Polish elite rowers, $84 \pm 1\%$ of AT4 power (321 ± 34 W) was determined as a submaximal load for 30-minute exercise. The metabolic response of LA of 2.94 ± 1.11 mmol/l was recorded (expressed as the mean value from measurements for 10, 20, and 30 minutes). The LA increase between 10 and 30 minutes was 1.18 ± 0.61 mmol/l and exceeded the criteria for the determination of MLSS [16]. In our previous study of rowers [15], mean LA concentration for MLSS was higher (3.66 ± 0.93 mmol/l) while in a study of German rowers [21], it was similar (3.0 ± 0.6 mmol/l). Despite a higher increase in LA than the adopted MLSS criterion, the exercise used can be found appropriate for high-intensity endurance training. High intensity of exercise was also evidenced by high HR values recorded in 30 min of exercise (169 ± 10 beats/min) and a significant cardio-respiratory drift (HR increase between 10 and 30 min was 10 ± 5 beats/min).

Based on the presented data, it seems interesting to verify the usefulness of SmO_2 and THb measurements using a Moxy device for the selection and evaluation of high-intensity aerobic exercise. According to the literature, this oximeter is a reliable device to measure SmO_2 at low and moderate levels of intensity. Unfortunately, at higher levels of intensity, there are greater differences in measurement results, probably due to tissue ischaemia or increased movement artefacts due to more frequent muscle contractions [9]. Other studies [22] have documented that both Moxy and PortaMon devices that are frequently used in scientific research provide physiologically reliable indicators of tissue oxygen saturation at rest and during exercise. In conclusion, the study confirmed good reliability of Moxy measurements, although it should be noted that this device is mainly dedicated to training monitoring.

Much attention in the literature has been devoted primarily to muscle oxygen saturation analysis during graded exercise tests, and it has been emphasized, among other things, that muscle oxygenation devices are a useful and reliable tool for determination of the lactate threshold loads for runners [8]. According to the quoted authors, these recording devices should be implemented by coaches and players as portable and non-invasive devices for monitoring changes in the load at the lactate threshold level in runners. Similarly, other studies have also indicated an acceptable level of compatibility between the indices measured using NIRS and the traditionally determined lactate thresholds for cyclists [10]. Also in a study of long-distance runners and triathletes, a high correlation between muscle

oxygenation breakpoint and the thresholds determined based on blood lactate concentration [14] was confirmed. It was also demonstrated that in cross-sectional studies of people with different aerobic fitness status, a higher level of VO_2max leads to the shift of muscle oxygen saturation breakpoint in the graded RAMP test towards the higher values of exercise intensity [23].

On the other hand, the submaximal constant-load intensity is often used in endurance training. From a practical point of view, it is especially important whether the muscle oxygen devices dedicated to coaches and athletes allow for the effective and precise choice of exercise load for heavy-intensity endurance training close to MLSS, which is often used by rowers. In an interesting scientific report, Bellotti et al. [12] tested the hypothesis that it is possible to accurately determine the MLSS status in healthy individuals based on deoxygenated haemoglobin, an indicator measured by NIRS. It was demonstrated that MLSS can be accurately estimated by measuring the level of deoxygenated haemoglobin. It was found that the threshold determined based on SmO_2 allowed for the correct determination of the running speed for 30-minute exercise at the level of maximal steady-state speed [14]. The main advantages of $\text{NIRS}_{\text{MLSS}}$ compared to techniques based on blood lactate concentration are non-invasiveness and time/cost efficiency.

In the summary of the literature data, Perrey and Ferrari [4] also confirmed that muscle oxygen saturation devices are a reliable and useful tool for determining training intensity, especially at the level of MLSS loads. Additionally, the tissue-saturation index (TSI) is characterized by faster feedback compared to HR and VO_2 , whereas SmO_2 measurements are not influenced by many factors such as temperature, hydration, emotional state, and others. Furthermore, the current assessment of muscle oxygen saturation using a preview on commonly used HR recorders offers opportunities for correcting the exercise load applied.

It should be noted that in the present study, the high intensity of aerobic training was characterized by a significant reduction in SmO_2 (on average $2.9 \pm 1.4\%$) between the 10th and 30th minute of exercise. As can be seen from Figure 3, the individual reduction in SmO_2 concerned all rowers, although it occurred at different percentage values of this index. In some rowers, the recorded levels of SmO_2 were below 10%. In others, they ranged from 25 to 30%. For comparison, in a study of canoeists racing at a distance of 200 and 500/1000 m on water, also with the use of the NIRS Moxy device located on the vastus lateralis muscle, a decrease in SmO_2 expressed as a difference from the resting value (ΔSmO_2) of 52 ± 17 and $51 \pm 18\%$ [5], respectively, was recorded. The data quoted were similar to our results (from $51.5 \pm 2.7\%$ for 10 min to $54.4 \pm 2.6\%$ for 30 min); Table 2. However, in the same study, kayakers, whose involvement of lower limb muscles during rowing is lower, the described index was $46 \pm 26\%$ (200 m) and $43 \pm 14\%$ (500/1000 m). Furthermore, in 30-minute submaximal exercise on the mechanical treadmill, relatively constant values of SmO_2 were observed for both the load corresponding to the maximal steady-state exercise

intensity and slightly above this state. However, the kinetics of changes in SmO_2 [14] were not studied in detail during this exercise.

These observations lead to the conclusion about the need to interpret SmO_2 measurements not only in absolute values but also in terms of the nature of changes in the discussed index over time. It is important whether there is a tendency to stabilize, or decrease in the oxygen saturation of the muscles in the subsequent minutes of exercise, because the significant decrease in SmO_2 was accompanied by a significant increase in LA, Table 2. Furthermore, the 30-minute exercise was accompanied by increasing rower's fatigue assessed on the Borg scale (although not significant), determined for 10 minutes as "Fairly light/Somewhat hard" (12.7 ± 0.5) and for 30 minutes as "Somewhat hard/ Hard" (14.1 ± 1.0), Table 2. As mentioned earlier, THb can be used to monitor changes to blood volume throughout a test. In contrast SmO_2 , THb values did not change in the following minutes of steady-state exercise. This could mean that during the test, although cardiovascular drift was observed, there was no major change to the amount of blood being delivered, which could be due to increasing contractile strength of the muscle (compressing the vessels underneath the sensor). However, in order to deal with the increasing O_2 demands of the muscle (shown by decreasing SmO_2) the heart needs to beat faster to supply adequate oxygen. The data obtained in this respect may suggest the low diagnostic value of this index in constant-intensity exercise. Similarly, Crum *et al.* [9] found that THb is characterized by low variation during the graded intensity test and does not correlate significantly with oxygen uptake and heart rate, which means that it does not appear to be an important index of muscle oxygen saturation. However, it should be emphasized that other authors using NIRS measurements showed that blood flow in tissues changes during physical exercise [24]. According to Gail and Segal [25], it seems plausible that functional sympatholysis is strongly correlated with changes in THb during exercise.

Limitations of the study

To sum up the discussion, it is important to mention a factor that may have influenced the conclusions drawn from the study. The sample size was small. However, in the case of La, HR, SmO_2 and ΔSmO_2 , the power of the tests ranged from 0.98 to 1, and all the effects were large. As far as THb is concerned, sample size 12 would provide a test power of 0.95. We are therefore convinced that the

test results of 8 competitors, who were elite senior rowers who have succeeded in the most prestigious rowing regattas, have a cognitive value and can be useful as reference data.

CONCLUSION

The present study of world-class Polish rowers demonstrated that the high intensity of the 30-minute aerobic exercise was accompanied by a significant reduction in SmO_2 by $2.9 \pm 1.4\%$ with no THb changes, which may suggest a low diagnostic value of THb in constant-load intensity exercise. Furthermore, the analysis of the results indicates the necessity to interpret SmO_2 measurements not only in absolute terms but first of all to observe the direction of saturation changes. It is important whether there is a tendency to stabilize or decrease muscle oxygen saturation in successive minutes of exercise, because the significant decrease in SmO_2 was accompanied by a significant increase in LA. Therefore, further research is needed, with a greater number of participants and performing the same exercise several times to see if there are individual muscle oxygen saturation profiles during the exercise. During aerobic constant-load exercise with intensities close to MLSS, the SmO_2 of the vastus lateralis ranged from 14.0 ± 3.13 to $11.1 \pm 2.81\%$ in 10 and 30 minutes respectively, with a reduction in muscle oxygenation (ΔSmO_2) exceeding 50%. The non-invasive nature of the measurement and the continuous monitoring of SmO_2 values are useful in the practice of monitoring training in terms of aerobic training loads. Will NIRS muscle oxygen saturation devices fully meet the expectations of scientists and coaches? We believe that the development of measurement technologies will allow many more limitations of this method to be solved in the coming years, which will increase its practical usefulness.

Acknowledgments

This research project (No 110.04) was funded by the Polish Ministry of Sport. The authors thank to all the participants in this study and Philip M. Batterson for their time and effort.

Conflict of interests

The authors declared no conflicts of interests regarding the publication of the manuscript.

REFERENCES

1. Klusiewicz A, Starczewski M, Ładyga M, Długolecka B, Braksator W, Mamcarz A, Sitkowski D. Reference values of maximal oxygen consumption for Polish rowers. *J Human Kin.* 2014;44:121–127. doi: 10.2478/hukin-2014-0117.
2. Born DP, Stöggl T, Swarén M, Björklund G. Near-Infrared Spectroscopy: More accurate than heart rate for monitoring intensity in running in hilly terrain. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12:440–447. doi: org/10.1123/ijspp2016-0101.
3. Zavorsky GS. Evidence and possible mechanisms of altered maximum heart rate with endurance training and tapering. *Sports Med.* 2000;29(1): 13–26. doi.org/10.2165/00007256-200029010-00002.
4. Perrey S, Ferrari M. Muscle oximetry in sports science: a systematic review. *Sports Med.* 2018;48(3):597–616. doi: 10.1007/s40279-017-0820-1.
5. Paquette M, Bieuzen F, Billaut F. Muscle oxygenation rather than $\text{VO}_{2\text{max}}$ as a strong predictor of performance in sprint canoe-kayak. *Int J Sports Physiol Perform.* 2018;13:1299–1307. doi: 10.1123/ijspp.2018-0077.
6. Chance B, Dait MT, Zhang C, Hamaoka T,

- Hagerman F. Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am J Physiol.* 1992;262(3 Pt 1):C766–75. doi: 10.1152/ajpcell.1992.262.3.C766
7. Cettolo V, Ferrari M, Biasini V, Quaresima V. Vastus lateralis O2 desaturation in response to fast and short maximal contraction. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(11):1949–1959. doi: 10.1249/mss.0b013e3181453476.
 8. Borges NR, Driller MW. Wearable lactate threshold predicting device is valid and reliable in runners. *J Strength Cond Res.* 2016;30(8):2212–2218. doi: 10.1519/JSC.0000000000001307.
 9. Crum EM, O'Connor WJ, Van Loo L, Valckx M, & Stannard SR. Validity and reliability of the Moxy Oxygen Monitor during incremental cycling exercise. *Eur J Sport Sci.* 2017;17(8):1037–1043. doi: 10.1080/17461391.2017.1330899.
 10. Driller MW, Borges NR, Plews D. Evaluating a new wearable lactate threshold sensor in recreational to highly trained cyclists. *Sports Eng.* 2016;19(4):229–235. doi: 10.1007/s12283-016-0198-6.
 11. Hettinga FJ, Konings MJ, Cooper CE. Differences in muscle oxygenation, perceived fatigue and recovery between long-track and short-track speed skating. *Front Physiol.* 2016;7:619. doi: 10.3389/fphys.2016.00619.
 12. Bellotti C, Calabria E, Capelli C, & Pogliaghi S. Determination of Maximal Lactate Steady State in healthy adults: can NIRS help? *Med Sci Sports Med.* 2013;45(6):1208–1216. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182828ab2.
 13. Keir DA, Fontana FY, Robertson TC, Murias JM, Paterson DH, Kowalchuk JM, Pogliaghi S. Exercise Intensity Thresholds: Identifying the Boundaries of Sustainable Performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(9):1932–40. doi: 10.1249/MSS.0000000000000613.
 14. Snyder AC, Parmenter MA. Using near-infrared spectroscopy to determine maximal steady state exercise intensity. *J Strength Cond Res.* 2009;23(6):1833–1840.
 15. Klusiewicz A. Relationship between the anaerobic threshold and the maximal lactate steady state in male and female rowers. *Biol Sport.* 2005;22:171–180.
 16. Heck H, Mader A, Hess G, Mücke S, Müller R, Hollmann W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med.* 1985;6:117–130.
 17. Ferrari M, Muthalib M, Quaresima V: The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Phil Trans R Soc A.* 2011;369,4577–4590. doi: 10.1098/rsta.2011.0230.
 18. Borg G. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc.* 1982;14(5):377–381.
 19. Marriott HE, Lamb KL. The use of ratings of perceived exertion for regulating exercise levels in rowing ergometry. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;72(3):267–271. doi: 10.1007/bf00838650.
 20. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Erlbaum;1988.
 21. Beneke R. Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27:863–867.
 22. McManus ChJ, Collison J, Cooper ChE. Performance comparison of the MOXY and PortaMon near-infrared spectroscopy muscle oximeters at rest and during exercise. *J Biomed Opt.* 2018; 23(1):015007. doi:10.1117/1.JBO.23.1.015007.
 23. Boone J, Barstow TJ, Celie B, Prieur F, Bourgois J. The interrelationship between muscle oxygenation, muscle activation and pulmonary oxygen uptake to incremental ramp exercise: influence of aerobic fitness. *Appl Physiol Nutr Met.* 2016;41(1):55–62. doi: 10.1139/apnm-2015-0261.
 24. Hamaoka T, Kevin K. McCully KK, Quaresima V, Yamamoto K, Chance B. Near-infrared spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation and oxidative metabolism in healthy and diseased humans. *J Biomed Opt.* 2007;12(6):062105 doi.org/10.1117/1.2805437.
 25. Gail DT, Segal SS. Neural control of muscle blood flow during exercise. *J Appl Physiol.* 2004;97:731–738. doi:10.1152/jappphysiol.00076.2004.



Usefulness of Portable Device to Establish Differences in Muscle Oxygenation Between the Wingate Test and Graded Exercise Test: Effect of Gender on Anaerobic and Aerobic Capacity in Speed Skaters

OPEN ACCESS

Edited by:

Borja Sañudo,
Independent Researcher, Seville,
Spain

Reviewed by:

Myriam Paquette,
Institut national du sport du québec,
Canada
Dale Wilson Chapman,
Curtin University, Australia

*Correspondence:

Andrzej Klusiewicz
andrzej.klusiewicz@insp.waw.pl
Michał Starczewski
michal.starczewski@awf.edu.pl

[†]This author shares first authorship

[‡]These authors have contributed
equally to this work

[§]This author shares senior authorship

Specialty section:

This article was submitted to
Exercise Physiology,
a section of the journal
Frontiers in Physiology

Received: 05 November 2021

Accepted: 21 January 2022

Published: 08 March 2022

Citation:

Rębiś K, Sadowska D,
Starczewski M and
Klusiewicz A (2022) Usefulness of
Portable Device to Establish
Differences in Muscle Oxygenation
Between the Wingate Test and
Graded Exercise Test: Effect of
Gender on Anaerobic and Aerobic
Capacity in Speed Skaters.
Front. Physiol. 13:809864.
doi: 10.3389/fphys.2022.809864

Kinga Rębiś^{1†‡}, Dorota Sadowska^{1‡}, Michał Starczewski^{1,2*§} and Andrzej Klusiewicz^{3*§}

¹Department of Physiology, Institute of Sport - National Research Institute, Warsaw, Poland, ²Faculty of Rehabilitation, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Warsaw, Poland, ³Faculty of Physical Education and Health, Białą Podlaską, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Warsaw, Poland

The aim of this study was to compare the oxygenation response in the vastus lateralis muscle (SmO₂) in two types of tests: supramaximal and maximal. Furthermore, gender differences in SmO₂ response to test exercise were assessed and the usefulness of muscle oxygenation measurements in the assessment of anaerobic and aerobic capacity was determined. The Wingate test (WAnT) and the graded exercise test (GXT) to exhaustion were performed on a cycle ergometer to examine 13 female and 14 male speed skaters from the junior and U23 national teams. During both tests, SmO₂ of the vastus lateralis muscle was recorded by near-infrared spectroscopy at baseline (at rest or post warm-up), at exercise, and during recovery. The most significant SmO₂ indices (differences between baseline and post-exercise indices and half time for SmO₂ to reach the maximal post-exercise value) were not significantly different between the tests. Gender was also not a differentiating factor in muscle oxygenation regardless of test type. In the GXT test, half time required for SmO₂ to reach the maximal value correlated negatively with VO_{2max} and test duration, thus confirming the usefulness of SmO₂ measurements in the assessment of the aerobic capacity of speed skaters. In contrast, the WAnT test showed no significant correlations between exercise indices and muscle oxygenation indices. From the standpoint of the assessment of anaerobic capacity, SmO₂ measurements showed little diagnostic value.

Keywords: speed skaters, supramaximal and maximal exercise tests, muscle oxygenation, anaerobic and aerobic capacity, portable oxygenation devices

INTRODUCTION

Periodic physical capacity testing of speed skaters often includes maximal aerobic testing with a graded load (Stangier et al., 2016) and supramaximal tests assessing anaerobic exercise capacity (Hofman et al., 2017). The aerobic contribution increases with the length of the race distance, but no relationship has been demonstrated between the level of the maximal oxygen

uptake and the athletic performance of speed skaters (Konings et al., 2015). Furthermore, speed skaters generate high power output during races, which requires adequate levels of aerobic and anaerobic capacity, although their proportional contribution varies depending on the race distance (Konings et al., 2015; Piuccio et al., 2018). On the other hand, an assessment of short-term exercise capacity is particularly relevant in speed skating for athletes competing over short distances, who generate the highest power values (Konings et al., 2015). According to the literature, skaters who score high on the Wingate test are also more successful during competitions (Nagasawa, 2013).

The latest near-infrared spectroscopy (NIRS) devices measuring muscle oxygenation (SmO_2) are useful in the study of speed skaters, especially when conducted on ice (Hesford et al., 2012; Hettinga et al., 2016). The specific position that is necessary for speed skating imposes certain physiological limitations. Prolonged isometric muscle contractions and a sitting low position impede blood flow to the lower limb muscles, reduce quadriceps oxygenation, and increase blood lactate levels. This impairs oxygen transport and leads to increasing fatigue processes (Hesford et al., 2013). Despite previously conducted research on ice, there remains several essential queries related to laboratory tests and NIRS measurements. In the present study, we sought to investigate whether changes in locomotory muscle oxygenation levels are dependent on the type of test conducted under laboratory conditions when assessed with NIRS. Understanding, how supramaximal and maximal exercise intensities impact muscle oxygenation in speed skating can help to deliver training monitoring methods based on SmO_2 measurements.

It should be emphasized that NIRS measurements are also increasingly used during testing in other sports such as cycling, cross-country running, and kayaking (Borges and Driller, 2016; Crum et al., 2017; Paquette et al., 2018). In the last few years, the introduction of mobile oximeters to measure the oxygenation level of myoglobin in the muscle cytoplasm and hemoglobin in the blood vessels of the muscle microcirculation (muscle oxygen saturation, SmO_2) has been particularly relevant to training practice (Perrey and Ferrari, 2018). SmO_2 measurements during exercise provide valuable information about oxygen transport and utilization in muscles (McCully and Hamaoka, 2000). Recovery time of muscle reoxygenation after submaximal or maximal exercise has been associated with muscle oxidative capacity. An increase in recovery time indicates an oxygen deficit, especially when exercise intensity increases (Hamaoka, 2013). In speed skating, the most common location for the NIRS monitor is vastus lateralis (Hesford et al., 2012; Hettinga et al., 2016). These measurements do not require blood sampling and are not associated with high financial costs, which is why, in recent years, there has been an increasing interest in this subject from both researchers and coaches. According to many authors, NIRS measurements are a simple, safe, and fast way to assess exercise capacity during short-term maximal contractions (Cettolo et al., 2007) and to determine so-called training intensity zones (Borges and Driller, 2016; Driller et al., 2016; Crum et al., 2017). For the training process, it is important to know not only the global maximal parameters of the athlete,

such as work rate, power, or maximal oxygen uptake, but also to understand the body's response to the effort at the local level, as assessed by NIRS. There have already been attempts to study muscle oxygenation in speed skaters (Hesford et al., 2012, 2013; Hettinga et al., 2016; Piuccio et al., 2018) indicating the importance of studies assessing the relationship between changes in SmO_2 and locomotor muscle fatigue in this sport. Despite the successful use of NIRS in studies on speed skaters, the differences in the SmO_2 changes between an aerobic and an anaerobic test has not been characterized in a group of high-performance athletes. It is therefore justified to continue the analysis using NIRS in high-performance speed skaters after various types of exercise, which has both diagnostic and practical significance in the selection of training loads (Hettinga et al., 2016).

An important aspect of our research was therefore the combination of classical physical laboratory tests performed periodically by speed skaters with measurements of muscle oxygenation. The main aim of this study was therefore to compare the oxygenation response of the vastus lateralis muscle in two types of tests: supramaximal and maximal, to determine the usefulness of NIRS measurements in assessing anaerobic and aerobic capacity in speed skaters. Furthermore, gender differences in SmO_2 response to test effort in athletes were also evaluated, which, to our knowledge, has not yet been described in the literature. We have found only one recent published research that attempts to assess muscle oxygenation responses in relation to gender, but unlike the current study, it involved physically active participants, not athletes (Espinosa-Ramírez et al., 2021).

MATERIALS AND METHODS

Subjects

The study involved 27 athletes (13 females and 14 males), who were the leading long track Polish speed skaters of junior and U23 national teams, aged 14.8–22.1 years. Training experience was 4.2 ± 1.5 in the group of female skaters and $3.5 \pm .9$ years in male skaters. Both female and male skaters practiced different speed skating events: sprint (11 skaters), middle-distance (9), and long-distance (7) speed skating events. Characterization of the study participants is presented in **Table 1**. Athletes performed two exercise tests on 1 day, with a minimum 2-h break between tests. Measurements of muscle oxygenation and classical exercise indices determined by standard exercise tests

TABLE 1 | Basic characteristics of the examined speed skaters ($n=27$), mean $\pm$ SD.

Variable/group	Female ($n = 13$)	Male ($n = 14$)
Age (years)	18.5 $\pm$ 2.0	17.9 $\pm$ 2.2
Body height (cm)	168.2 $\pm$ 3.	182.0 $\pm$ 6.8
Body weight (kg)	60.4 $\pm$ 3.6	73.9 $\pm$ 6.5
BMI (kg/m^2)	21.3 $\pm$ 1.0	22.3 $\pm$ 1.2
Training experience (years)	4.2 $\pm$ 1.5	3.5 $\pm$.9

(the Wingate test and graded exercise test) used in speed skaters were analyzed.

The study was conducted in cooperation with National Speed Skating Association during the preparatory training period (in September) of the annual training plan. The presented study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki (1975) and was approved by the Institutional Research Ethics Committee.

Athletes were selected for the study by national teams coaches and participated voluntarily. They were informed about the right to withdraw at every stage of the research. All participants provided written consent for participation, and in the case of underage, such consent was received from their legal guardians.

Exercise Tests

The anaerobic capacity test (the Wingate Test, WAnT) was performed first on a Monark 874E cycle ergometer (Monark Exercise AB, Sweden). This test was preceded by a standard 5-min warm-up with a load of 1.0 W/kg. Next, after 2 min of rest, the athlete performed a 30-s test with the load individually adjusted to body weight (7.5% of body weight). The subject's task was to produce the highest possible cadence after the "Start!" command and to maintain it as high as possible for the test duration. The speed skaters were instructed not to raise their hips from the saddle but to always make their best effort to pedal during the Wingate test. The basic mechanical parameters of the effort, i.e., work done, maximum power, and fatigue index, were computed using a computer program coupled with the cycle ergometer (MCE 5.1—JBA Z. Staniak, Poland).

The maximal graded exercise test (GXT) was performed on a Lode Excalibur Sport PFM cycle ergometer (Lode B. V., Netherlands). The test consisted of 3-min stages with graded load performed continuously. The test was started in male and female skaters with a load of 1.0 W/kg and the load was increased every stage by .7 W/kg (female skaters) or .8 W/kg (male skaters). During the test, heart rate (HR) was continuously recorded using the H9 Heart Rate Sensor (Polar Electro Oy, Finland). Respiratory gases were measured during each testing session using wearable and wireless breath-by-breath pulmonary gas analyzer (Metamax 3B, Cortex Biophysik GmbH, Germany), previously demonstrated to be reliable for measuring oxygen uptake (Overstreet et al., 2017).

After completing both tests, the athletes continued pedaling for active cool-down (light exercise at a load of .5 W/kg performed for 3 min after the completion of the test) aimed at avoiding an orthostatic shock.

Maximal Aerobic Power

Maximal aerobic power ($P_{\max}$) was calculated as a proportion of the time and a power of the last executed bout in the GXT (Kuipers et al., 1985). The equation for calculation is presented below:

$$P_{\max} = P_{\text{LFE}} + (T_{\text{LE}}/T_{\text{St}} * \Delta P).$$

$P_{\max}$ —maximal aerobic power; P_{LFE} —power of the last fully executed step; T_{LE} —time executed in the final step; T_{St} —time of the last step; and ΔP —increase in power between last two steps.

Maximal Oxygen Consumption

Maximal oxygen uptake ($\text{VO}_{2\max}$) was defined as the highest amount of oxygen consumption over a 30-s period during the test. The maximal intensity exercise necessary for the estimation of $\text{VO}_{2\max}$ was defined by the following criteria: the VO_2 plateauing with increasing workload, the post-exercise blood lactate concentration >8 mmol/l, the respiratory exchange ratio (RER) >1.1, and attainment of the age-adjusted maximal heart rate expressed as $\text{HR}_{\max} = 220 - \text{participant age}$. If at least two of the above criteria were met during the exercise, the attained effort and oxygen uptake were regarded as maximal.

Measurements of Muscle Oxygenation

During both tests, a NIRS device (Moxy monitors; Fortiori Design LLC, Hutchinson, MN, United States) was placed on the vastus lateralis (VL) muscle that is active during cycling. The Moxy monitor is a continuous wave near-infrared spectroscopy monitor. It uses a new type of algorithm that is based on Monte Carlo modeling. The system uses four wavelengths at 680, 720, 760, and 800 nm. The spacings between two emitters and detector are 12.5 and 25 mm respectively. The device was approximately 15 ± 2 cm above the proximal border of the patella on the vastus lateralis muscle belly and was fixed to the right limb with a dark 7.5 cm dynamic tape by the same person. The muscle oxygen saturation (SmO_2) was recorded at baseline (at rest for GXT or post warm-up for WAnT), during exercise, and during the recovery period. SmO_2 reflects the dynamic balance between oxygen (O_2) consumption and supply (Ichimura et al., 2006). SmO_2 measurements taken 2 min after the warm-up and before the test were taken as baseline values for WAnT and GXT, respectively. The differences in SmO_2 (ΔSmO_2) between baseline and minimal exercise levels were also calculated. The reoxygenation rate after both tests were evaluated as the half time required for SmO_2 recovery (SmO_2 HTR; McCully et al., 1994; Nagasawa, 2013). The SmO_2 data values for further calculations were averaged from measurements made 2.0 min before tests (SmO_2 baseline), during 2 s at exercise minimum (SmO_2 minimum), and recovery maximum (SmO_2 maximum). The mean SmO_2 for 2 s immediately after the completion of the exercise was defined as 0% and the maximum SmO_2 in the first 3 min of the recovery phase after completion of exercise was defined as 100%. The SmO_2 HTR was then defined as the time from the completion of exercise to the time to reach 50% SmO_2 .

Statistical Analysis

The statistical analyses were conducted with the Statistica 13.0 software. The normal distribution of variables was examined using the Shapiro–Wilk test. The significance of differences was assessed using the Student test and Mann–Whitney U-test for variables with a distribution different from the normal distribution. The power of relationships between the variables was determined based on Spearman's rank correlation coefficients.

(*R*). The coefficient intervals for correlations were also presented. The level of statistical significance was set at $p \leq .05$.

RESULTS

No significant differences in muscle oxygenation of the vastus lateralis muscle indices were observed between female and male speed skaters during both tests (see **Tables 2** and **3**).

During WAnT for the combined analysis of male and female results, a rapid real-time decline was found in SmO_2 , lasting until the end of the test. Average ΔSmO_2 across the whole group ($n=27$) was $51.1 \pm 7.8\%$ (**Figure 1**).

SmO_2 HTR was 23.5 ± 8.5 s on average. During the GXT, ΔSmO_2 , and SmO_2 HTR were $51.9 \pm 10.6\%$ and 26.0 ± 11.4 s, respectively. While ΔSmO_2 and SmO_2 HTR did not differ between the WAnT and the GXT, significant differences were found in baseline, minimum, and maximum SmO_2 levels, which were significantly lower after WAnT ($60.2 \pm 6.3\%$, $9.2 \pm 4.4\%$, and

70.9 ± 7.3 , respectively) compared to GXT (by $64.7 \pm 8.5\%$, $12.8 \pm 6.6\%$, and 76.5 ± 7.3 , respectively; **Figure 1**).

During WAnT, no significant correlations were observed between muscle oxygenation indices and exercise capacity indices (Power Max, Work, and Fatigue Index), (**Table 4**).

Furthermore, in this test, muscle oxygenation indices did not correlate significantly with $\text{VO}_{2\text{max}}$ expressed in absolute values and calculated per body weight (**Table 5**).

In GXT, significant correlations with muscle oxygenation indices were observed between SmO_2 HTR, maximal oxygen uptake, and maximal power in absolute ($r = -.40$, and $r = -.40$, respectively, $p < .05$) and relative ($r = -.39$, $r = -.49$, respectively, $p < .05$) values (**Table 5**), and test duration ($r = -.46$, $p < .05$), (**Figure 2**).

DISCUSSION

An important observation was that there were no significant gender differences in the muscle oxygenation response to anaerobic and aerobic exercise. This is related to the fact that regardless of gender, factors that improve oxygen delivery to working muscles, such as muscle capillary density, blood volume, plasma volume influencing cardiac output, red blood cell volume, or total hemoglobin mass, improve with increased fitness level (Heinicke et al., 2001; Malczewska-Lenczowska et al., 2013; Steiner et al., 2019; Zelenkova et al., 2019). Importantly, our study reports that the rate of SmO_2 reoxygenation showed a significant correlation with $\text{VO}_{2\text{max}}$ and exercise capacity in GXT. In speed skaters with higher maximal oxygen uptake and test duration, the quadriceps muscle oxygenation returned to maximal levels faster after GXT. Similarly, Ichimura et al. (2006) also showed that the rate of muscle reoxygenation after a ramp test was faster in subjects with higher $\text{VO}_{2\text{max}}$ levels. It should be emphasized that the reoxygenation times obtained in both tests were affected by active cool-down. These results suggest that the rate of muscle reoxygenation in the graded exercise test depended on the aerobic capacity of speed skaters.

The participants in our study were selected Polish speed skaters of different ages and speed skating events (sprinters, middle-distance, and long-distance skaters). They were junior and U23 speed skaters with a maximal oxygen uptake of 52.1 ± 4.6 in female skaters and 62.0 ± 4.8 ml/kg/min in male skaters. A review of the literature suggests that skaters achieve relatively low values of maximal oxygen uptake in a test performed on a cycle ergometer compared to other endurance sports (between 52.2 and 54.9 ml/kg/min for females and 57.2 and 62.0 ml/kg/min for male skaters; Konings et al., 2015).

We observed that SmO_2 indices show little diagnostic value for the assessment of anaerobic capacity in highly trained athletes, indicating a lack of significant correlation with both the maximal power and work in WAnT (**Table 4**). Another study (Nagasawa, 2013) indicated a slower recovery rate of muscle oxygenation after WAnT in long-distance runners compared with that in sprinters and healthy controls. In contrast to this study, a larger group of female and male speed skaters did not show a higher reoxygenation rate after an analogous exercise (WAnT) in participants with lower

TABLE 2 | Values of selected indices recorded during the Wingate test in the examined group of female and male speed skaters ($n=27$), mean $\pm$ SD.

Variable/group	Female ($n = 13$)	Male ($n = 14$)	<i>p</i>
Power max (W)	676 $\pm$ 55	916 $\pm$ 100	$\leq .0001$
Power max (W/kg)	11.2 $\pm$.7	12.4 $\pm$.8	.0004
Work (J)	16,130 $\pm$ 925	21,768 $\pm$ 2,300	.0003 ^U
Work (J/kg)	268 $\pm$ 15	297 $\pm$ 15	$\leq .0001$
SmO_2 baseline (%)	59.3 $\pm$ 6.5	61.2 $\pm$ 6.2	.4501
SmO_2 minimum (%)	8.6 $\pm$ 3.5	9.7 $\pm$ 5.2	.5478
SmO_2 maximum (%)	70.3 $\pm$ 9.6	71.6 $\pm$ 4.5	.6605
ΔSmO_2 (%)	50.7 $\pm$ 8.1	51.5 $\pm$ 7.9	.7853
SmO_2 HTR (s)	24.3 $\pm$ 11.4	22.7 $\pm$ 4.5	.6799 ^U

ΔSmO_2 (%)— SmO_2 difference between baseline and minimum values. SmO_2 HTR—half time for SmO_2 to reach the maximal value. *p*—difference between female and male skaters. ^UMann–Whitney U test.

TABLE 3 | Values of selected indices recorded during the graded exercise test in the examined group of female and male speed skaters ($n=27$), mean $\pm$ SD.

Variable/group	Female ($n = 13$)	Male ($n = 14$)	<i>p</i>
P_{max} (W)	243 $\pm$ 18	353 $\pm$ 45	$\leq .0001$
P_{max} (W/kg)	4.04 $\pm$.33	4.77 $\pm$.43	$\leq .0001$
$\text{VO}_{2\text{max}}$ (l/min)	3.18 $\pm$.26	4.53 $\pm$.42	$\leq .0001$
$\text{VO}_{2\text{max}}$ (ml/kg/min)	52.1 $\pm$ 4.6	62.0 $\pm$ 4.8	$\leq .0001$
SmO_2 baseline (%)	65.2 $\pm$ 9.6	64.3 $\pm$ 7.7	.7825
SmO_2 Minimum (%)	13.4 $\pm$ 6.8	12.3 $\pm$ 6.6	.6917
SmO_2 Maximum (%)	76.5 $\pm$ 5.2	76.6 $\pm$ 5.7	.9316
ΔSmO_2 (%)	51.9 $\pm$ 10.7	52.0 $\pm$ 11.0	.5934 ^U
SmO_2 HTR (s)	29.8 $\pm$ 13.1	22.6 $\pm$ 8.7	.0894 ^U

P_{max} —maximal aerobic power. ΔSmO_2 (%)— SmO_2 difference between baseline and minimum values. SmO_2 HTR (s)—half time for SmO_2 to reach the maximal value. *p*—difference between female and male skaters. ^UMann–Whitney U test.

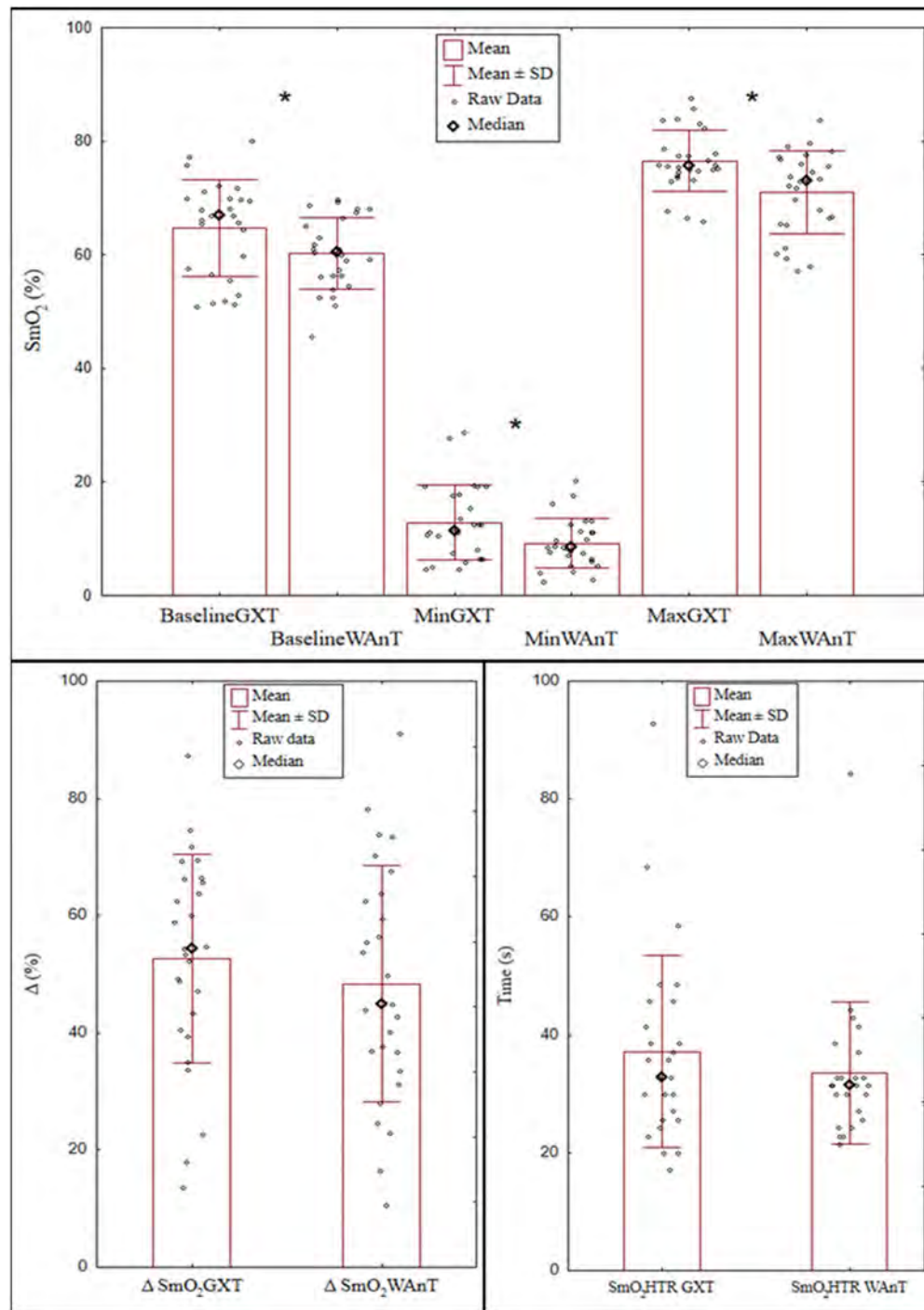


FIGURE 1 | Muscle oxygen saturation (SmO₂): at baseline, as exercise minimum values, post exercise maximum values, differences between baseline and minimum values (Δ SmO₂) and half time for SmO₂ to reach the maximal value (SmO₂ HTR) during the graded exercise test (GXT) and the Wingate test (WAnT) in the combined group female and male speed skaters ($n=27$). *Mann-Whitney U test ($p<.05$).

VO₂max expressed both in absolute values and converted to body weight (Table 5). While the usefulness of SmO₂ is reduced for the assessment of anaerobic capacity in speed skaters, this does not exclude that such measurements may be important in the choice of the training load, e.g., during high-intensity

intervals. However, it should be mentioned that this problem was not the subject of our research. In presented research SmO₂ indices, maximal power and work in WAnT, maximal power, and maximal oxygen uptake in GXT were determined. To our knowledge, this is the first research paper comparing

TABLE 4 | Spearman's rank correlation coefficients values between selected indices recorded during the Wingate test in the examined group of female and male speed skaters ($n=27$).

Variable	Power Max		Work		Fatigue Index	
	(W)	(W/kg)	(J)	(J/kg)	%	W/s
Δ SmO ₂ (%)	.05 (–.34–.42)	.34 (–.05–.64)	.10 (–.29–.46)	.31 (–.08–.62)	–.36 (–.65–.02)	–.19 (–.53–.20)
SmO ₂ HTR	.10 (–.29–.46)	.05 (–.34–.42)	.06 (–.33–.43)	.02 (–.36–.40)	.20 (–.19–.54)	.02 (–.36–.40)
SmO ₂ minimum (%)	.13 (–.26–.49)	.03 (.35–.41)	.13 (–.26–.49)	.02 (–.36–.40)	.17 (–.22–.52)	.16 (–.23–.51)

The numbers in the table presenting r values and coefficient interval for r in the brackets. Δ SmO₂ (%)—SmO₂ difference between resting and minimum values. SmO₂ HTR—half time for SmO₂ to reach the maximal values.

TABLE 5 | Spearman's rank correlation coefficient values between VO₂max and Pmax and selected indices of muscle oxygenation recorded during the Wingate and graded exercise tests in the group of female and male speed skaters ($n=27$).

Variable	VO ₂ max		Pmax	
	(l/min)	(ml/kg/min)	W	W/kg
Wingate test				
SmO ₂	.05	–.01	.17	.19
minimum (%)	(–.42–.34)	(–.39–.37)	(–.22–.52)	(–.20–.53)
Δ SmO ₂ (%)	.08	.10	–.11	–.07
	(–.31–.45)	(–.29–.46)	(–.47–.28)	(–.44–.32)
SmO ₂ HTR	–.18	–.17	–.19	–.33
	(–.21–.52)	(–.52–.22)	(–.53–.24)	(–.63–.06)
Graded exercise test				
SmO ₂	–.06	–.28	.15	.06
Minimum (%)	(–.43–.33)	(–.60–.11)	(–.24–.50)	(–.33–.24)
Δ SmO ₂ (%)	.10	.19	–.03	–.04
	(–.29–.46)	(–.20–.53)	(–.41–.35)	(–.41–.34)
SmO ₂ HTR	–.40*	–.39*	–.40*	–.49*
	(–.68 to –.02)	(–.67 to –.01)	(–.68 to –.02)	(–.73 to –.14)

The numbers in the table presenting r values and coefficient interval for r in the brackets. Δ SmO₂ (%)—SmO₂ difference between baseline and minimum values. SmO₂ HTR—half time for SmO₂ to reach the maximal values. * $p<.05$.

SmO₂ responses in speed skaters between two different types of exercise tests. Previous studies (Buchheit and Ufland, 2011; Nagasawa, 2013; Paquette et al., 2020; Vasquez-Bonilla et al., 2021) examined recovery following WAnT and short-term efforts in kayak and football players, or the rate of reoxygenation following maximal aerobic exercise test (Ichimura et al., 2006). One of the study's limitations is the differences in baseline SmO₂ values found among speed skaters could be due to the slightly different phase of measurement, i.e., 2 min after the warm-up in WAnT (affecting better blood supply and muscle oxygenation) and at rest before GXT, (Figure 1) or slight position change of the NIRS device. However, in our research, SmO₂ post warm-up values in WAnT were lower than rest SmO₂ before GXT, that is in contrast to previous observations. The short duration of the interval (2 min) between the warm-up and the WAnT test may have contributed to the lower than expected baseline SmO₂ values. Additionally, it can be assumed that the described differences also contributed to the lower minimum SmO₂ values after WAnT. Unlike previous studies by other authors (Nagasawa, 2013), the WAnT methodology intentionally used a warm-up as required by the methodology

of performing this test. According to Frikha et al. (2016), the warm-up model used and the duration of the rest before performing 30 s of exercise has a significant effect on the results obtained and the assessment of anaerobic capacity.

The values of the remaining SmO₂ indices, i.e., Δ SmO₂ and SmO₂HTR are not dependent on the type of test performed (Figure 1). One reason for the lack of differences may have been the rapid rate of decline in muscle oxygenation observed already several seconds after the start of exercise, which was important for the short-term WAnT test. Other cardiopulmonary indices such as heart rate and oxygen uptake require much longer exercise duration to reach their maximal values. These observations support the need for further research into local changes in oxygenation and their use in the control and monitoring of exercise load.

CONCLUSION

This study shows that regardless of the type of test, the gender of speed skaters does not differentiate between muscle oxygenation responses. The rate of muscle reoxygenation in the graded exercise test depends on the aerobic capacity of speed skaters. However, SmO₂ indices show less usefulness diagnostic value for assessing anaerobic capacity. Finally, the most significant SmO₂ indices (differences between baseline and minimal SmO₂ and half time for SmO₂ to reach the maximal post-exercise levels) were not significantly different between the Wingate test and graded exercise test.

PRACTICAL APPLICATIONS

The use of non-invasive measurements of the rate of muscle reoxygenation can be useful in assessing the aerobic capacity of speed skaters, thus contributing to a more in-depth analysis of post-training adaptations.

LIMITATION

The study group consisted of relatively few representatives of different speed skating events (sprint $n=11$, middle distance $n=9$, and long distance $n=7$). In future research, it may

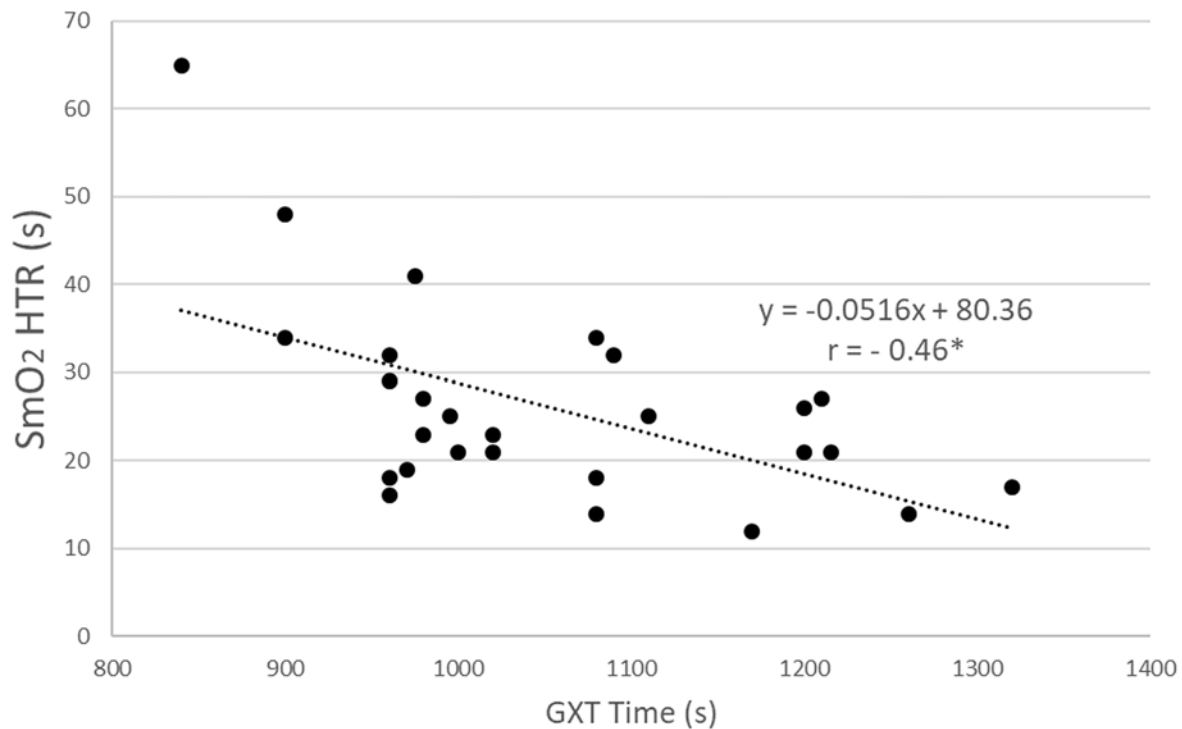


FIGURE 2 | Statistically significant Spearman's rank correlation between half time for SmO_2 to reach the maximal value (SmO_2 HTR) and test time in the graded exercise test (GXT) in the combined group of female and male speed skaters ($n=27$). $*p<.05$.

be advisable to conduct similar analyses on larger groups of speed skaters with regard to individual events.

Institute). The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by the Komisja Etyki Badań Naukowych, Instytut Sportu—Państwowy Instytut Badawczy (The Scientific Research Ethics Committee, Institute of Sport—National Research

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors listed have made a substantial, direct and intellectual contribution to the work, and approved it for publication.

FUNDING

The study was conducted with financial support from the Ministry of Culture National Heritage and Sport of the Republic of Poland under grant number 2021/0408/Udot/32/DSW.

REFERENCES

- Borges, N. R., and Driller, M. W. (2016). Wearable lactate threshold predicting device is valid and reliable in runners. *J. Strength Cond. Res.* 30, 2212–2218. doi: 10.1519/JSC.0000000000001307
- Buchheit, M., and Ufland, P. (2011). Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 111, 293–301. doi: 10.1007/s00421-010-1654-9
- Cettolo, V., Ferrari, M., Biasini, V., and Quaresima, V. (2007). vastus lateralis O_2 desaturation in response to fast and short maximal contraction. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 1949–1959. doi: 10.1249/mss.0b013e3181453476
- Crum, E. M., O'Connor, W. J., Van Loo, L., Valckx, M., and Stannard, S. R. (2017). Validity and reliability of the moxy oxygen monitor during incremental cycling exercise. *Eur. J. Sport Sci.* 17, 1037–1043. doi: 10.1080/17461391.2017.1330899
- Driller, M., Plews, D., and Borges, N. (2016). Wearable near infrared sensor for determining an athlete's lactate threshold during exercise. *NIR News* 27, 8–10. doi: 10.1255/nirn.1609
- Espinosa-Ramírez, M., Moya-Gallardo, E., Araya-Román, F., Riquelme-Sánchez, S., Rodríguez-García, G., Reid, W. D., et al. (2021). Sex-differences in the oxygenation levels of intercostal and vastus lateralis muscles during incremental exercise. *Front Physiol.* 12:738063. doi: 10.3389/fphys.2021.738063

- Frikha, M., Chaâri, N., Mezghanni, N., and Souissi, N. (2016). Influence of warm-up duration and recovery interval prior to exercise on anaerobic performance. *Biol. Sport* 33, 361–366. doi: 10.5604/20831862.1221830
- Hamaoka, T. (2013). Muscle oxygenation monitoring using near-infrared spectroscopy. *J. Phys. Fitness Sports Med.* 2, 203–207. doi: 10.7600/jpfsm.2.203
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., et al. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *Int. J. Sports Med.* 22, 504–512. doi: 10.1055/s-2001-17613
- Hesford, C. M., Cardinale, M., Laing, S., and Cooper, C. E. (2013). NIRS measurements with elite speed skaters: comparison between the ice rink and the laboratory. *Adv. Exp. Med. Biol.* 765, 81–86. doi: 10.1007/978-1-4614-4989-8_12
- Hesford, C. M., Laing, S. J., Cardinale, M., and Cooper, C. E. (2012). Asymmetry of quadriceps muscle oxygenation during elite short-track speed skating. *Med. Sci. Sports Exerc.* 44, 501–508. doi: 10.1249/MSS.0b013e31822f8942
- Hettinga, F. J., Konings, M. J., and Cooper, C. E. (2016). Differences in muscle oxygenation, perceived fatigue and recovery between long-track and short-track speed skating. *Front. Physiol.* 7:619. doi: 10.3389/fphys.2016.00619
- Hofman, N., Orie, J., Hoozemans, M. J. M., Foster, C., and de Koning, J. J. (2017). Wingate test as a strong predictor of 1500-m performance in elite speed skaters. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 1288–1292. doi: 10.1123/ijspp.2016-0427
- Ichimura, S., Murase, N., Osada, T., Kime, R., Homma, T., Ueda, C., et al. (2006). Age and activity status affect muscle reoxygenation time after maximal cycling exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38, 1277–1281. doi: 10.1249/01.mss.0000227312.08599.f1
- Konings, M. J., Elferink-Gemser, M. T., Stoter, I. K., van der Meer, D., Otten, E., and Hettinga, F. J. (2015). Performance characteristics of long-track speed skaters: a literature review. *Sports Med.* 45, 505–516. doi: 10.1007/s40279-014-0298-z
- Kuipers, H., Verstappen, F. T. J., Keizer, H. A., Geurten, P., and Van Kranenburg, G. (1985). Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *Int. J. Sports Med.* 6, 197–201. doi: 10.1055/s-2008-1025839
- Malczewska-Lenczowska, J., Sitkowski, D., Orysiak, J., Pokrywka, A., and Szygula, Z. (2013). Total haemoglobin mass, blood volume and morphological indices among athletes from different sport disciplines. *Arch. Med. Sci.* 5, 780–787. doi: 10.5114/aoms.2013.36926
- McCully, K. K., Halber, C., and Posner, J. D. (1994). Exercise-induced changes in oxygen saturation in the calf muscles of elderly subjects with peripheral vascular disease. *J. Gerontol.* 49, B128–B134. doi: 10.1093/geronj/49.3.b128
- McCully, K. K., and Hamaoka, T. (2000). Near-infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exerc. Sport Sci. Rev.* 28, 123–127.
- Nagasawa, T. (2013). Slower recovery rate of muscle oxygenation after sprint exercise in long-distance runners compared with that in sprinters and healthy controls. *J. Strength Cond. Res.* 27, 3360–3366. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182908fcc
- Overstreet, B. S., Bassett, D. R. Jr., Crouter, S. E., Rider, B. C., and Parr, B. B. (2017). Portable open-circuit spirometry systems. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 57, 227–237. doi: 10.23736/S0022-4707.16.06049-7
- Paquette, M., Bieuzen, F., and Billaut, F. (2018). Muscle oxygenation rather than $\text{VO}_{2\text{max}}$ as a strong predictor of performance in sprint canoe-kayak. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 13, 1299–1307. doi: 10.1123/ijspp.2018-0077
- Paquette, M., Bieuzen, F., and Billaut, F. (2020). Effect of a 3-weeks training camp on muscle oxygenation, VO_2 and performance in elite Sprint kayakers. *Front. Sports Act Living* 2:47. doi: 10.3389/fspor.2020.00047
- Perrey, S., and Ferrari, M. (2018). Muscle oximetry in sports science: a systematic review. *Sports Med.* 48, 597–616. doi: 10.1007/s40279-017-0820-1
- Piuccio, T., Soares, R., Diefenthaler, F., Millet, G. Y., and Murias, J. M. (2018). Oxygen uptake and muscle deoxygenation kinetics during skating: comparison between slide-board and treadmill skating. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 13, 783–788. doi: 10.1123/ijspp.2017-0440
- Stangier, C., Abel, T., Hesse, C., Claen, S., Mierau, J., Hollmann, W., et al. (2016). Effects of cycling vs. running training on endurance performance in preparation for inline speed skating. *J. Strength Cond. Res.* 30, 1597–1606. doi: 10.1519/JSC.0000000000001247
- Steiner, T., Maier, T., and Wehrin, J. P. (2019). Effect of endurance training on hemoglobin mass and $\text{VO}_{2\text{max}}$ in male adolescent athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 51, 912–919. doi: 10.1249/MSS.0000000000001867
- Vasquez-Bonilla, A. A., Camacho-Cardenosa, A., Timón, R., Martínez-Guardado, I., Camacho-Cardenosa, M., and Olcina, G. (2021). Muscle oxygen desaturation and re-saturation capacity limits in repeated sprint ability performance in women soccer players: a new physiological interpretation. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18:3484. doi: 10.3390/ijerph18073484
- Zelenkova, I. E., Zotkin, S. V., Korneev, P. V., Kopro, S. V., and Grushin, A. A. (2019). Relationship between total hemoglobin mass and competitive performance in endurance athletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 59, 352–356. doi: 10.23736/S0022-4707.18.07865-9

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Copyright © 2022 Rębiś, Sadowska, Starczewski and Klusiewicz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Article

Estimation of Lactate Thresholds, Aerobic Capacity and Recovery Rate from Muscle Oxygen Saturation in Highly Trained Speed Skaters and Healthy Untrained Individuals

Kinga Rebiś ^{1,*} , Andrzej Klusiewicz ², Barbara Długolecka ², Paweł Różański ², Karol Kowieski ² and Tomasz Kowalski ^{1,*} 

¹ Department of Physiology, Institute of Sport–National Research Institute in Warsaw, 01-982 Warsaw, Poland

² Faculty of Physical Education and Health, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, 00-968 Białą Podlaska, Poland; andrzej.klusiewicz@awf.edu.pl (A.K.); barbara.dlugolecka@awf.edu.pl (B.D.); pawel.rozanski@awf.edu.pl (P.R.); karol.kowieski@awf.edu.pl (K.K.)

* Correspondence: kinga.rebis@insp.pl (K.R.); tomasz.kowalski@insp.pl (T.K.)

Abstract: Objective: The main objective of this study was to compare lactate thresholds and aerobic capacity from a graded-intensity exercise test (GXT) for near-infrared spectroscopy measurements in healthy, untrained individuals and highly trained athletes. **Methods:** This study included 29 untrained students (13 females) and 27 highly trained speed skaters (13 females). A maximal effort GXT was performed on a cycloergometer. The lactate-based aerobic and anaerobic thresholds, and the corresponding thresholds for muscle oxygen saturation (SmO₂), were determined. **Results:** The power values determined for all thresholds were significantly higher in female and male speed skaters compared to male and female college students. SmO₂ at anaerobic thresholds was significantly lower in female speed skaters than in female students. Both female and male skaters showed greater changes in SmO₂ after the GXT compared to students. The recovery did not significantly differ between groups within gender. There was a significant positive correlation in females between the rate of muscle reoxygenation and VO₂max power ($r = 0.610$). In speed skaters, the rate of muscle reoxygenation was not significantly higher than students and correlated positively with VO₂max ($r = 0.449$). **Conclusions:** The SmO₂ at the exercise thresholds, during and after maximal exercise, depends on the training status of the individual. The participants with a higher physical fitness level showed greater decreases in Δ SmO₂ at the AT level, as well as after maximal exercise. SmO₂ corresponding to the well-established exercise thresholds may be applied to guide training prescription. The rate of muscle reoxygenation after a GXT was also dependent on the aerobic capacity of the participants.

Keywords: exercise; physical fitness; cardiopulmonary exercise testing; near-infrared spectroscopy; anaerobic threshold



Citation: Rebiś, K.; Klusiewicz, A.; Długolecka, B.; Różański, P.; Kowieski, K.; Kowalski, T. Estimation of Lactate Thresholds, Aerobic Capacity and Recovery Rate from Muscle Oxygen Saturation in Highly Trained Speed Skaters and Healthy Untrained Individuals. *J. Clin. Med.* **2024**, *13*, 5340. <https://doi.org/10.3390/jcm13175340>

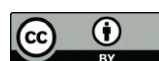
Academic Editor: Andrea Ermolao

Received: 24 July 2024

Revised: 20 August 2024

Accepted: 3 September 2024

Published: 9 September 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Over the past few years, wearable devices that apply near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the oxygenation (muscle oxygen saturation, SmO₂) level of myoglobin in the muscle cytoplasm, and hemoglobin in the blood vessels of muscle, have been introduced into scientific research and training practise [1–3]. As myoglobin oxygenation is expected to remain almost unchanged during exercise, any alteration in myoglobin and hemoglobin signals should mainly reflect changes in hemoglobin [4]. SmO₂ reflects the dynamic balance between oxygen (O₂) supply and O₂ demand, mainly at the superficial level of muscle [3], whilst providing real-time information on oxygen utilization during exercise [5]. It is a local measurement reflecting differences or changes in SmO₂ during exercise, depending on NIRS placement [6], and the NIRS device can be worn in laboratory or field settings to improve ecological validity.

In the sport of speed skating, modern oximeters allow for on-body measurements of SmO_2 in the laboratory [7,8] and in natural training conditions [9,10], and these are becoming useful in evaluating training effects [11,12]. The measured indices may be displayed in real time, similar to heart rate recordings, on a smartphone, tablet or computer. Our previous research has confirmed that NIRS offers a simple, safe and fast way to both assess maximal exercise capacity [13] and monitor aerobic training load [14]. Other laboratories have confirmed the utility of NIRS for the determination of intensity zones from an incremental load test [15,16], and for establishing the anaerobic threshold (AT cut-off point), based on the dynamics of SmO_2 changes during exercise [1,15,17–20]. The aforementioned studies are of significant practical importance, as they confirm the efficacy of a non-invasive, wearable sensor for evaluating training intensity and selecting exercise loads [21].

From a practical point of view, establishing one's anaerobic threshold (AT) is particularly important for the assessment of aerobic capacity, as well as the selecting of individualized training-intensity zones [22]. However, Jamnick et al. [22] identified more than 25 different methods of determining threshold load, potentially reducing the translation and interpretation of these measures in sport. The identification of the threshold for 2 and 4 mmol blood lactate concentration, or the modified D_{max} threshold (Mod D_{max}) and lactate threshold (LT), is easy to determine using available software [23]. The lactate thresholds discussed are relatively easily determined and widely applied in different sport settings [22,24]. Therefore, we investigated the exercise thresholds and associations with NIRS-derived SmO_2 levels. The approach may be particularly useful in speedskaters, as restricted blood flow during major parts of the skating stroke cycle influences the measured lactate concentrations [25,26]. Traditionally, sports scientists and coaches draw conclusions regarding whole-body lactate dynamics based on lactate concentrations in capillary blood. However, in the case of speedskating and observed deviation from the normal relationship between local and whole-body lactate concentrations, the validity of traditional lactate-derived exercise thresholds was not thoroughly established [25]. Therefore, novel methods of intensity monitoring may play a crucial role in on-ice and inline speedskating. Despite this, research on NIRS application in speedskating remains limited.

Previous studies have described the SmO_2 responses at LT levels in representative groups of healthy, untrained individuals and highly trained athletes, separately; however, the literature analyzing differences between these groups remains scarce. Also, limited research has evaluated the utility of muscle oxygenation across a graded exercise test (GXT) and compared the effect of training (or physical fitness) status. Moreover, muscle reoxygenation after exercise cessation may inform recovery effectiveness and training status [27]. Thus, the main aim of this study was to compare the aerobic and anaerobic thresholds based on SmO_2 levels in healthy, physically active individuals and highly trained athletes. An additional goal of this study was to establish whether the SmO_2 during, and after, a ramp-incremental test is contingent on training status and its association with well-established performance variables. The hypothesis of this study was that the level of physical fitness is associated with SmO_2 at the aerobic threshold, AT, maximal deoxygenation levels and muscle reoxygenation rate, independently of gender.

2. Materials and Methods

This study included 29 students from the Academy of Physical Education and 27 Polish speed skaters, who were representing the National Team at a junior or senior level. The total sample size was calculated with G * Power (v3.1.9.7) and was 52 for two-tailed *t*-tests for independent means (effect size = 0.8, α = 0.05, power = 0.8) and 46 for multiple linear regression (effect size = 0.5, α = 0.05, power = 0.8, number of predictors = 5). The characteristics of the participants are shown in Table 1. The speed skaters (males and females) were significantly younger, taller and possessed a higher body mass, compared to male and female students, respectively. The speed skaters were also characterized by a

significantly lower BMI, with the students presenting a mean BMI value ($25.6 \pm 3.4 \text{ kg/m}^2$) that indicated that they were slightly overweight.

Table 1. Basic characteristics (mean $\pm$ SD) of females and males in the examined group of students and speed skaters.

Variable/Group	Females	
	Students (n = 13)	Speed Skaters (n = 13)
Age (years)	23.1 ± 1.0	$18.5 \pm 2.0^*$
Body height (cm)	164.9 ± 4.7	$168.2 \pm 3.7^*$
Body mass (kg)	60.7 ± 6.5	60.4 ± 3.6
BMI (kg/m^2)	22.3 ± 3.7	21.3 ± 1.0
Training experience (years)	-	4.2 ± 1.5
	Males	
	Students (n = 16)	Speed Skaters (n = 14)
Age (years)	23.8 ± 1.1	$17.9 \pm 2.2^*$
Body height (cm)	181.1 ± 7.1	$182.0 \pm 6.8^*$
Body mass (kg)	84.0 ± 11.8	$73.9 \pm 6.5^*$
BMI (kg/m^2)	25.6 ± 3.4	$22.3 \pm 1.2^*$
Training experience (years)	-	3.5 ± 0.9

*—statistically significant differences between female students and female speed skaters or male students and male speed skaters $p < 0.05$.

This study was conducted in cooperation with the National Speed Skating Association during the preparatory period of an annual training plan. The research outlined was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and its later amendments, with approval no. KEBN-22-71-KR (14 March 2022) from the Research Ethics Committee of Institute of Sport–National Research Institute, Warsaw, Poland. The participants chose to partake voluntarily, and they were informed about the right to withdraw at every stage of the study. All participants provided written consent before study commencement, and in the case of underage participants, such consent was obtained from their legal guardians.

2.1. Graded Exercise Test

A maximal-intensity GXT was performed on a bicycle ergometer with measurements of gas exchange, heart rate, the SmO_2 of the vastus lateralis muscle and blood lactate carried out at regular intervals before and after exercise. Figure 1 shows the placement of the NIRS sensor.

The GXTs were performed using the Cortex MetaMax B3 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany), the breath-by-breath method and a cycloergometer. The gas analyser was previously demonstrated as a reliable tool for measuring oxygen uptake [28].

The Lode Corival ergometer (Lode B.V., Groningen, The Netherlands) was used in the student group, and the Cyclus II Ergometer (RBM, Leipzig, Germany) was used in the speed skater group. The elite speed skaters used a cycle ergometer based on an individual setting of the cyclist's bicycle frame to achieve optimal conditions for the test task. The testing equipment had been calibrated according to the manufacturer's instructions.

The participants underwent an incremental step test consisting of 3 min efforts performed continuously. The test commenced at 30–70 W, and the load increased for 30–50 W with every 3 min step, which was individually adjusted for sex, body mass and fitness status to achieve possibly similar testing times for all the participants (about 17–18 min). The participants were instructed to continue their effort until total exhaustion. After completing both tests, the participants continued pedalling for active cool-down (light exercise at a load of 0.5 W/kg performed for 3 min after the completion of the test), aimed at avoiding orthostatic shock.



Figure 1. Location of the MOXY monitor on the vastus lateralis muscle belly.

During the GXT, heart rate (HR) was continuously recorded using the H9 Heart Rate Sensor (Polar Electro Oy, Helsinki, Finland). Blood samples were taken from the fingertip during the last 15 s of every step, immediately after and 3 min after the cessation of the test. Each sample was collected in a 20 μ L capillary tube by the laboratory technician. Blood lactate concentration was determined with the Super GL2 analyzer (Dr. Müller Gerätebau GmbH, Freital, Germany) immediately after the testing procedures.

2.2. Aerobic and Anaerobic Thresholds, Maximal Aerobic Power

Aerobic and anaerobic thresholds (2 and 4 mmol, modified Dmax and lactate threshold-LT), and the corresponding threshold SmO₂ values, were derived from the application described by Newell et al. [23]. The aerobic (2 mmol) and anaerobic (4 mmol) thresholds were determined by the interpolation of the power output values and SmO₂ registered at the 2 or 4 mmol/L blood lactate level. The criteria for determining modified Dmax were as follows: the performance of a minimum of 5 exercise loads of full duration (3 min) and a final blood lactate concentration of more than 8 mmol/L. Maximal aerobic power (MAP) was calculated as a proportion of time and power achieved in the last executed bout of the GXT, according to Kuipers et al. [29]. The equation for this calculation is presented below:

$$MAP = P_{LFE} + \left(\frac{T_{LE}}{T_{St}} \times \Delta P \right)$$

MAP—maximal aerobic power; P_{LFE} —power of the last fully executed step; T_{LE} —time executed in the final step; T_{St} —time of the last step; ΔP —increase in power between the last two steps.

2.3. Maximal Oxygen Consumption

Maximal oxygen uptake (VO₂max) was defined as the highest amount of oxygen consumption over a 30 s period during exercise testing. The maximal intensity of exercise necessary for the estimation of VO₂max was defined by the following criteria: the present

oxygen uptake plateau (growth $< 100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ in oxygen uptake despite an increase in workload), the post-exercise blood lactate concentration $> 8 \text{ mmol/L}$, the respiratory exchange ratio (RER) > 1.1 and the attainment of the age-adjusted maximal heart rate, expressed as $\text{HR}_{\text{max}} = 220 - \text{participant age}$. If at least two of the above criteria were met during the exercise, the attained effort and oxygen uptake were regarded as maximal.

2.4. Measurements of Muscle Oxygen Saturation

During the GXT, a NIRS device (Moxy Monitor; Fortiori Design LLC, Hutchinson, MN, USA) was placed on the vastus lateralis (VL) muscle that is active during cycling. The Moxy monitor is a continuous wave near-infrared spectroscopy sensor. It uses a new type of algorithm that is based on Monte Carlo modelling. The device has two detectors spaced at 12.5 and 25 mm from the emitter, and uses 4 wavelengths of 680, 720, 760 and 800 nm. The default sampling rate cycles through the four wavelengths 80 times every 2 s and averages out the readings for an output rate of 0.5 Hz. The device was placed approximately $15 \pm 2 \text{ cm}$ above the proximal border of the patella on the vastus lateralis muscle belly and was fixed to the right limb with a dark 7.5 cm flexible tape by the same person (Figure 1).

The SmO_2 was recorded at rest, during exercise and recovery. SmO_2 measurements taken 2 min before the GXT were taken as baseline values. The differences in SmO_2 (ΔSmO_2) between baseline and minimal SmO_2 during exercise were also calculated. The reoxygenation rate after the GXT was evaluated as the half-time required for SmO_2 recovery ($\text{SmO}_2 \Delta \text{Time}$) [27,30], presented in Figure 2.

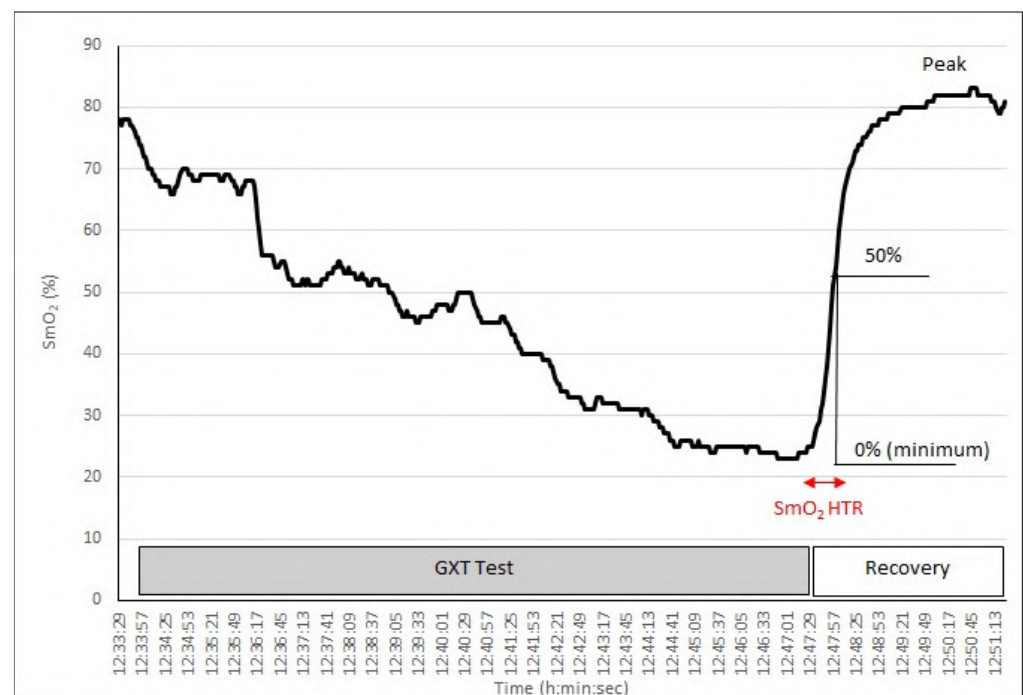


Figure 2. Method of evaluating the time for 50% recovery muscle oxygen saturation (SmO_2 recovery half-time, SmO_2HTR) after the maximal graded exercise test (GXT) for one male student (based on individual data from the present study, compiled according to the guidelines from Nagasawa, 2013).

For other metrics, the SmO_2 data were averaged from measurements made 2.0 min before testing (SmO_2 rest), during and after the test with 2-s intervals (the default time interval in the accompanying Moxy software, Version 1.4.4). Data were recorded for the minimum SmO_2 (2 s at end of the test) (minimum, $\text{SmO}_2 \text{ min}$) and over 2 s at recovery (maximum, $\text{SmO}_2 \text{ max}$). The $\text{SmO}_2 \text{ min}$ after the completion of the exercise was defined as 0%, and the $\text{SmO}_2 \text{ max}$ of the recovery phase was defined as 100%. $\text{SmO}_2 \Delta \text{time}$ was

then defined as the time from the completion of the exercise to the time to reach 50% SmO₂Max [27]. SmO₂ recovery rate was calculated according to the following formula:

$$\text{SmO}_2 \text{ Recovery Rate (\%/s)} = 50\% \text{ SmO}_2\text{Max (\%)} / \text{SmO}_2 \Delta \text{ Time (s)}$$

SmO₂ threshold values were determined by averaging measurements at 30 s intervals for the respective exercise loads.

2.5. Statistical Analyses

All statistical analyses were conducted with Statistica 13.0 software (Statistica 13, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). The normal distribution of variables was examined using the Shapiro–Wilk test. The differences between groups in demographic data, oxygenation and performance parameters were assessed using a Student's *t*-test or the Mann–Whitney U-test for variables with a non-normal distribution. The effect size was calculated as Cohen's *d* (where 0.2 represents a small effect size, 0.5 represents a medium effect size and 0.8 represents a large effect size) for Student's *t*-tests or rank biserial correlation (*r*, where 0.1 represents a small effect size, 0.3 represents a medium effect size and 0.5 represents a large effect size) for Mann–Whitney U-tests. The relationships between the oxygenation and performance variables were tested using Pearson's correlation coefficient (*R*). A coefficient of determination (*R*²) was also computed to aid interpretation. We used published criteria, as described by Evans [31], to describe the strength of the correlations; <0.20 as very weak, 0.20–0.39 as weak, 0.40–0.59 as moderate, 0.60–0.79 as strong and >0.80 as very strong. The level of statistical significance was set at *p* ≤ 0.05.

3. Results

The female and male speed skaters were characterized by a higher physical capacity in comparison to male and female students, based on significant differences between the groups in terms of MAP and VO₂max (Table 2).

Table 2. Peak values (mean ± SD) of selected indices during the maximal graded exercise test in female and male students and speed skaters.

Females					
Variable/Group	Students (n = 13)	Speed Skaters (n = 13)	<i>p</i> -Value	Effect Size	
				Cohen's <i>d</i>	Rank Biserial Correlation (<i>r</i>)
Test time (min: s)	16:51 ± 2:10	16:59 ± 1:51	0.87	0.06	-
MAP (W)	169 ± 22	254 ± 18 *	<0.001	-	1.0
MAP _{rel} (W/kg)	2.82 ± 0.37	4.04 ± 0.33 *	<0.001	3.67	-
VO ₂ max (L/min)	2.28 ± 0.28	3.18 ± 0.26 *	<0.001	3.31	-
VO ₂ max (mL/kg/min)	38.0 ± 3.7	52.1 ± 4.6 *	<0.001	1.68	-
Lactate _{PEAK} (mmol/L)	10.7 ± 1.7	13.1 ± 1.3 *	<0.001	1.61	-
Males					
Variable/Group	Students (n = 16)	Speed Skaters (n = 14)	<i>p</i> -Value	Effect Size	
				Cohen's <i>d</i>	Rank Biserial Correlation (<i>r</i>)
Test time (min: s)	18:32 ± 2:17	18:05 ± 2:07	0.59	0.20	-
MAP (W)	258 ± 32	353 ± 45 *	<0.001	2.86	-
MAP _{rel} (W/kg)	3.10 ± 0.45	4.77 ± 0.43 *	<0.001	4.08	-
VO ₂ max (L/min)	3.58 ± 0.54	4.53 ± 0.42 *	<0.001	3.10	-
VO ₂ max (mL/kg/min)	42.9 ± 6.7	62.0 ± 4.8 *	<0.001	1.98	-
Lactate _{PEAK} (mmol/L)	11.8 ± 1.8	13.5 ± 2.3 *	0.03	0.83	-

MAP—absolute maximal aerobic power, MAP_{rel}—relative maximal aerobic power; lactate_{PEAK}—post-exercise lactate; *—difference (*p* < 0.05) between female students and female speed skaters, or male students and male speed skaters.

In all cases, power values for the aerobic and anaerobic lactate thresholds (in W and W/kg) were significantly higher in female and male speed skaters relative to male and female students (Table 3). SmO₂ values at anaerobic thresholds expressed in % were significantly lower in female speed skaters (AT₄: 32.7 ± 11.5, Dmax: 31.0 ± 9.2 and LT: 33.9 ± 9.6) than in female students (45.2 ± 11.1, 44.3 ± 10.3 and 45.6 ± 10.5, respectively). In speed skaters, the differences in question, although not statistically significant, showed a similar direction of change (Table 3).

Table 3. Values (mean ± SD) of selected indices at the aerobic and anaerobic thresholds in female and male students and speed skaters.

Females					
Variable/Group	Students (n = 13)	Speed Skaters (n = 13)	p-Value	Effect Size	
				Cohen's d	Rank Biserial Correlation (r)
P ₂ MMOL (W)	68 ± 22	122 ± 35 *	<0.001	1.86	-
P ₂ MMOL (W/kg)	1.14 ± 0.34	2.00 ± 0.64 *	<0.001	1.71	-
P _{AT4} (W)	114 ± 19	183 ± 21 *	<0.001	3.51	-
P _{AT4} (W/kg)	1.90 ± 0.29	3.04 ± 0.41 *	<0.001	3.248	-
P _{DMAX} (W)	112 ± 13	180 ± 22 *	<0.001	3.72	-
P _{DMAX} (W/kg)	1.88 ± 0.25	3.00 ± 0.45 *	<0.001	-	1.00
P _{LT} (W)	105 ± 12	169 ± 21 *	<0.001	-	0.99
P _{LT} (W/kg)	1.77 ± 0.29	2.82 ± 0.44 *	<0.001	2.88	-
SmO ₂ 2MMOL (%)	52.2 ± 13.1	48.8 ± 11.2	0.49	0.27	-
SmO ₂ AT ₄ (%)	45.2 ± 11.1	32.7 ± 11.5 *	<0.001	-	0.68
SmO ₂ DMAX (%)	44.3 ± 10.3	31.0 ± 9.2 *	<0.001	-	0.82
SmO ₂ LT (%)	45.6 ± 10.5	33.9 ± 9.6 *	0.007	-	0.66
Males					
Variable/Group	Students (n = 16)	Speed Skaters (n = 14)	p-Value	Effect Size (Females)	
				Cohen's d	Rank Biserial Correlation (r)
P ₂ MMOL (W)	103 ± 28	201 ± 35 *	<0.001	2.64	-
P ₂ MMOL (W/kg)	1.25 ± 0.43	2.72 ± 0.57 *	<0.001	2.95	-
P _{AT4} (W)	173 ± 27	267 ± 41 *	<0.001	2.78	-
P _{AT4} (W/kg)	2.08 ± 0.40	3.62 ± 0.46 *	<0.001	3.58	-
P _{DMAX} (W)	173 ± 22	263 ± 43 *	<0.001	2.67	-
P _{DMAX} (W/kg)	2.08 ± 0.33	3.56 ± 0.44 *	<0.001	-	0.98
P _{LT} (W)	177 ± 22	253 ± 48 *	<0.001	-	0.96
P _{LT} (W/kg)	2.13 ± 0.29	3.41 ± 0.48 *	<0.001	-	1.0
SmO ₂ 2MMOL (%)	45.0 ± 13.2	42.5 ± 7.7	0.54	0.22	-
SmO ₂ AT ₄ (%)	30.5 ± 15.5	28.3 ± 8.6	0.64	0.17	-
SmO ₂ DMAX (%)	32.5 ± 13.3	29.4 ± 6.5	0.44	0.29	-
SmO ₂ LT (%)	31.8 ± 13.1	30.4 ± 7.1	0.71	0.14	-

P₂ MMOL—power at aerobic threshold (lactate = 2 mmol/L); P_{AT4}—power at anaerobic threshold (lactate = 4 mmol/L); P_{DMAX}—power at modified Dmax threshold; P_{LT}—power at lactate threshold; SmO₂ MMOL—muscle oxygenation threshold (lactate = 2 mmol/L); SmO₂ AT₄—muscle oxygenation threshold (lactate = 4 mmol/L); SmO₂ DMAX—muscle oxygenation Dmax threshold; SmO₂ LT—muscle oxygenation at lactate threshold; *—difference ($p < 0.05$) between female students and female speed skaters, or male students and male speed skaters.

The female speed skaters also showed significantly greater changes in SmO₂ (differences between rest and anaerobic threshold SmO₂ values in %) for lactate thresholds of 4 mmol, Dmax and LT (32.5 ± 13.0, 34.2 ± 10.2 and 31.3 ± 10.7) compared to female students (21.0 ± 11.1, 21.8 ± 10.3 and 20.5 ± 10.5) (Figure 3). Male skaters also showed greater ΔSmO₂ values relative to male students, but these were not statistically significant.

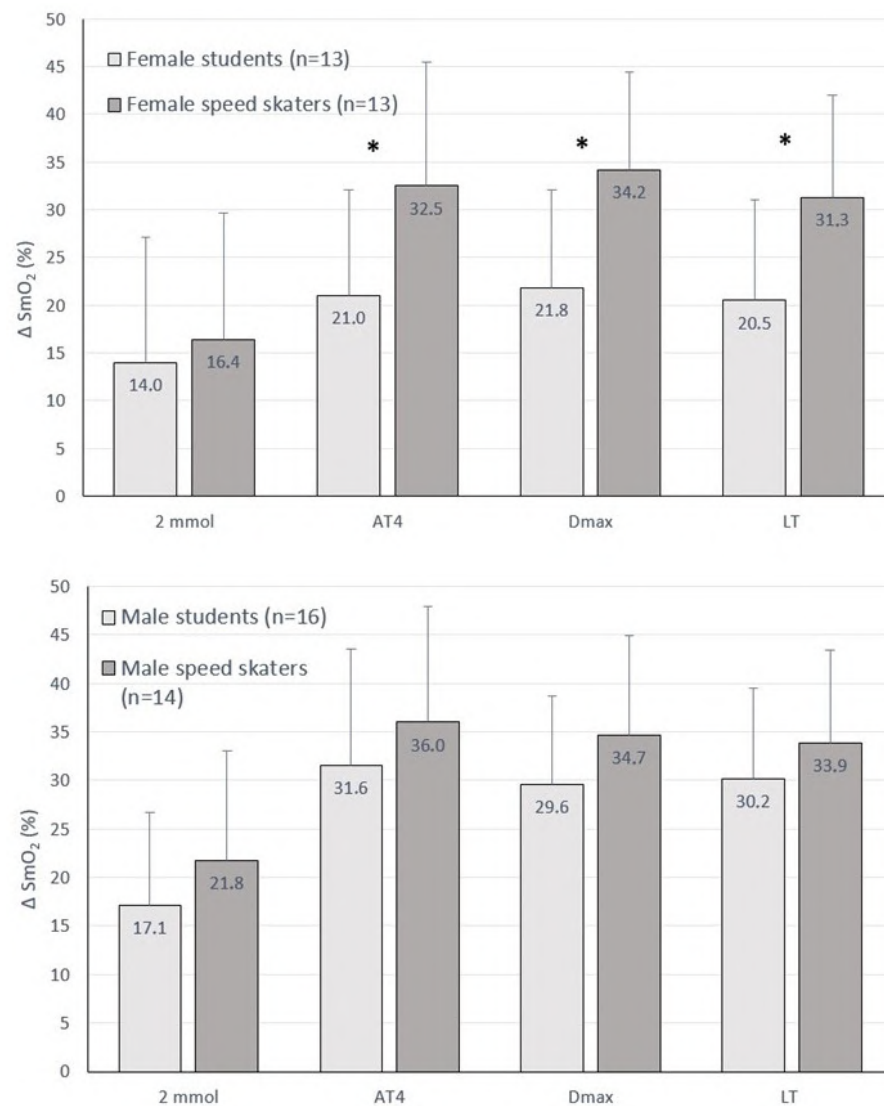


Figure 3. Muscle oxygen saturation (SmO₂) at the aerobic (2 mmol) and anaerobic thresholds (4 mmol, Dmax, LT), expressed as Δ (SmO₂ at Rest – SmO₂ at the aerobic or anaerobic threshold) in the groups of students and speed skaters. *—difference ($p < 0.05$) between female students and female speed skaters.

Both female and male skaters additionally showed a greater decrease in Δ SmO₂ (differences between rest and minimal value) after the GXT, as compared to students (female 51.9 ± 10.7 vs. $34.7 \pm 9.7\%$ and male 52.0 ± 11.0 vs. $44.7 \pm 11.5\%$, respectively) (Figure 4).

The time to achieve 50% SmO₂ in the recovery period (50% SmO₂ recovery time) did not differentiate between female and male students and speed skaters (Figure 5).

However, a higher recovery rate (SmO₂ recovery rate) was observed in female speed skaters (1.08 ± 0.33 %/s) when compared to female students (0.76 ± 0.24 %/s) (Figure 6).

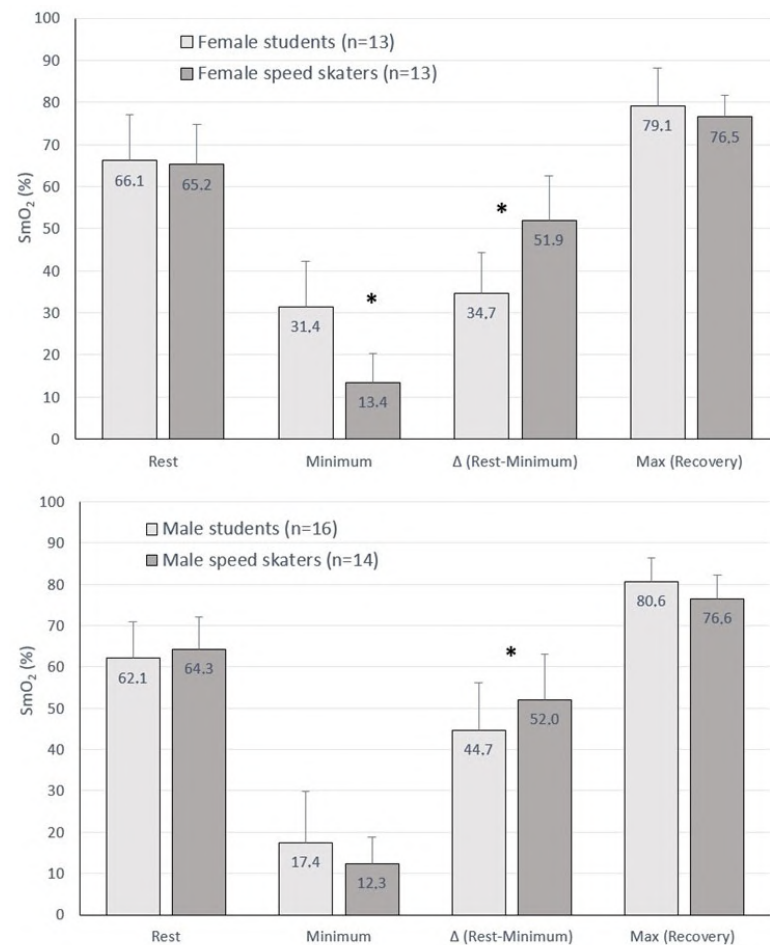


Figure 4. Muscle oxygen saturation (SmO₂): at baseline, as exercise minimum values, differences between the baseline and minimum (Δ Baseline – Minimum) and the recovery maximum values during the maximal graded exercise test in the groups of students and speed skaters. *—difference ($p < 0.05$) between female students and female speed skaters, or male students and male speed skaters.

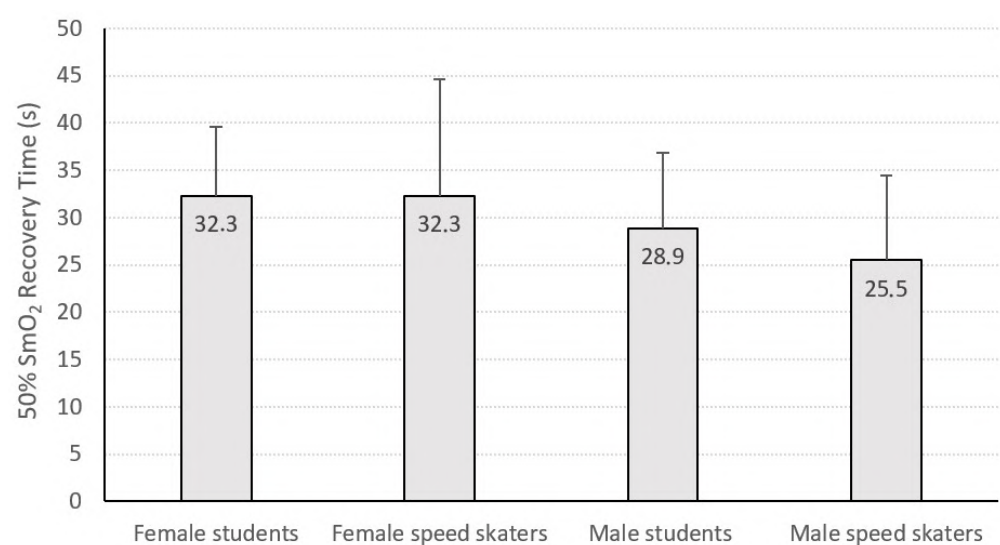


Figure 5. Time for the 50% recovery of muscle oxygen saturation (SmO₂) in the groups of students and speed skaters.

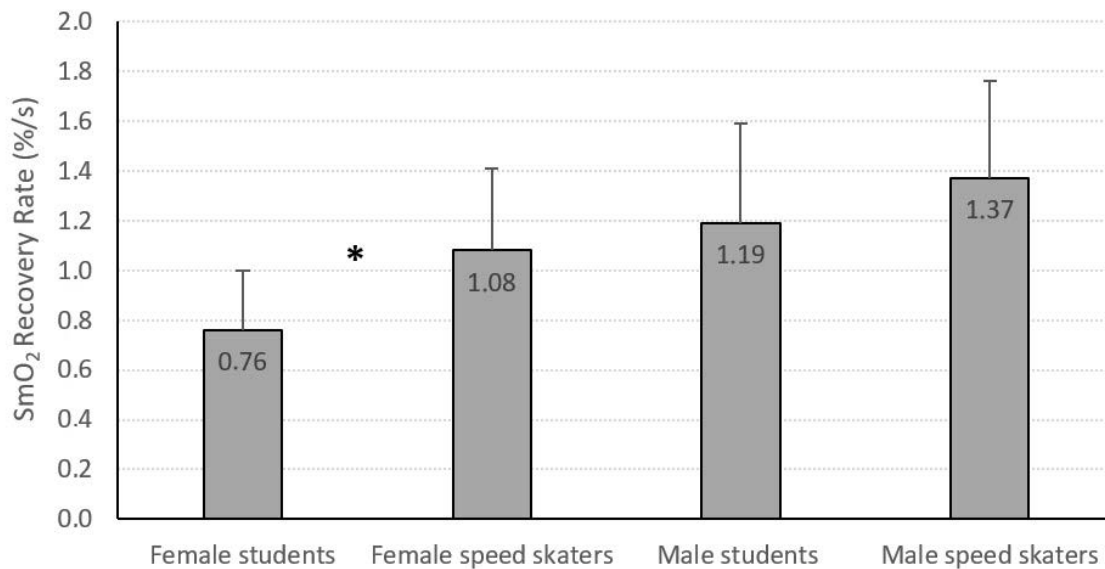


Figure 6. Values of SmO₂ recovery rate in the groups of students and speed skaters. *—difference ($p < 0.05$) between female students and female speed skaters.

Correlational analyses revealed a significant and strong relationship ($r = 0.610$, shared variance of ~37%) was observed in females between SmO₂ recovery rate and peak power (W/kg) (Figure 7).

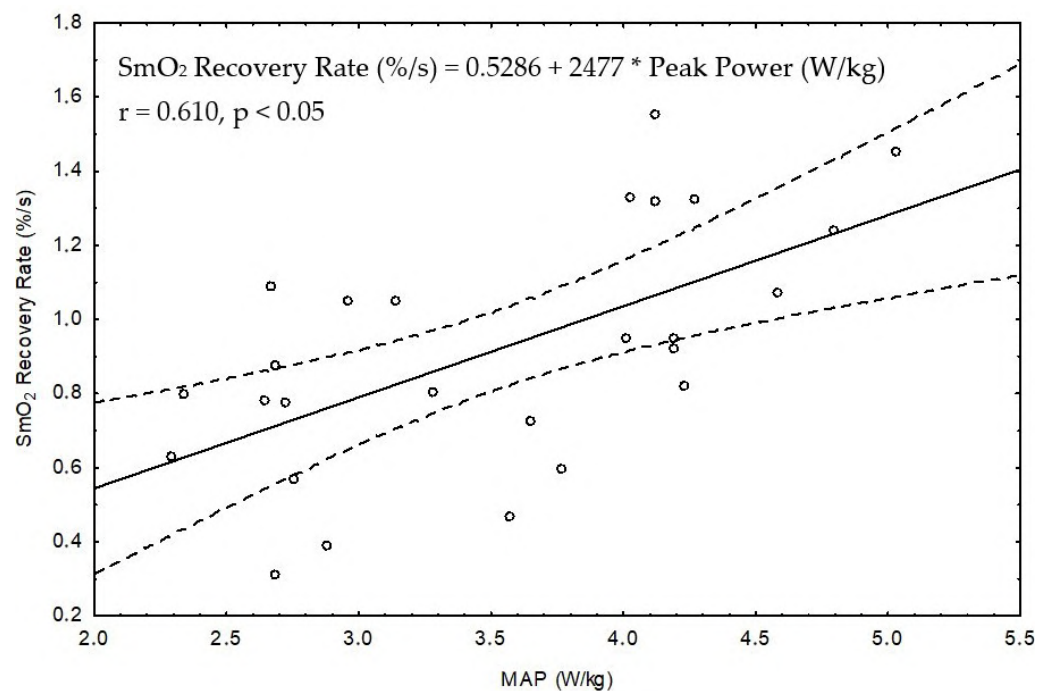


Figure 7. Statistically significant correlation between the SmO₂ recovery rate and maximal aerobic power (MAP) in the combined groups of female students and speed skaters ($n = 26$).

In male speed skaters, although the recovery rate was not significantly higher versus the student group (Figure 6), a significant and moderate relationship ($r = 0.449$, shared variance of ~20%) was observed between SmO₂ recovery rate and VO₂max (Figure 8).

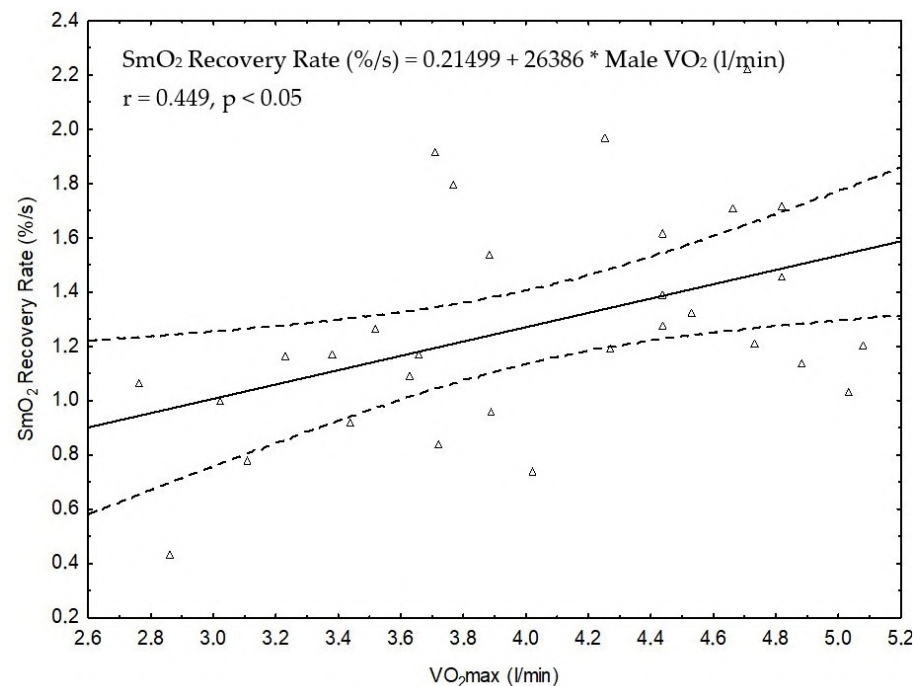


Figure 8. Statistically significant correlation between the SmO₂ recovery rate and VO₂max in the combined groups of male students and speed skaters (n = 30).

4. Discussion

The presented investigation reports multiple novel findings. The SmO₂ at the AT, during and after maximal exercise, depends on the training status of the individual. Those participants with a higher physical fitness level showed greater changes in ΔSmO_2 at the AT level, as well as after maximal exercise. The rate of muscle reoxygenation after a GXT was also dependent on the aerobic capacity of the participants.

In the available literature regarding the determination of AT values based on measurements of SmO₂, studies have been conducted mostly among trained individuals [31–34] or in groups of recreationally trained individuals [19]. One of the main goals of our research was to compare aerobic and AT in groups with different training statuses, i.e., in highly trained speed skaters and untrained students. Blood lactate measurements are widely considered the gold standard to establish threshold values [35]. However, attempts to determine said thresholds based on non-invasive measurements are still of particular interest. In recent years, such studies have been undertaken using the SmO₂ index [18,19,32–34]. Other work [19] has shown that both the maximum distance (Dmax) and modified maximum distance (mDmax) values should not be used to estimate the LT due to the unreliable detection of the SmO₂ threshold from session to session. Similarly, in other studies [33], the ventilatory (VT) and tissue saturation index (TSI_T) thresholds were not concurrent with the LT. In contrast to the cited study, Grassi et al. [36] reported a significant correlation between the onset of muscle deoxygenation and the onset of blood lactate accumulation (OBLA, a nominal La of 4 mmol/L). Similarly, Driller et al. [1] pointed out the agreement and practical usefulness of the AT determined in cyclists by a wearable NIRS device when measuring SmO₂ compared to four traditionally used methods of determining the LT. Also, Borges and Driller [18] observed in runners no significant differences in load for the AT determined using the aforementioned NIRS sensor compared to five traditional methods, based on blood lactate determinations.

Consequently, there is still no consensus among authors on whether non-invasive, portable and easy-to-use NIRS measurement devices can adequately capture the aerobic–anaerobic transition by providing an equivalent to index to the LT that has been used for many years [37,38]. In our research, we used different lactate thresholds (“aerobic threshold”, “modf. Dmax”, “OBLA” and “LT”) to determine relevant values for SmO₂.

Although this method was benchmarked against blood lactate concentration measurements, it allowed us to use SmO_2 values to monitor exercise intensity and training load. In the state-of-the-art literature, both the nominal values of SmO_2 and the differences between resting and exercise SmO_2 values (ΔSmO_2) have been used [6,39]. Calculating ΔSmO_2 allows for the large variation in resting values of SmO_2 to be taken into account. Previously, the same way of expressing muscle oxygen saturation values was presented by Cayot et al. [19]. This method was also used for ΔSmO_2 values, but was calculated in a slightly different way; it was used for the interpretation of data in studies of kayakers and canoeists [6].

In our study, a higher level of athletic training (female skaters vs. female students) was accompanied by a lower SmO_2 value at the AT, when presented both on a nominal scale (Table 3) and described as ΔSmO_2 (Figure 3). At the same time, the female skaters achieved higher power outputs at the AT. Speculatively, the SmO_2 level at the AT may reflect relative training status, and NIRS measurements during submaximal efforts may offer a non-invasive marker of physical fitness. These findings are applicable to both aerobic and anaerobic training zones and apply to constant intensity efforts.

Notably, NIRS-derived thresholds are obtained locally, and over a small area of the activated muscle. However, both traditional methods of determining AT, based on blood lactate concentrations and ventilation threshold, reflect the body's global response to a given effort. During exercise on the cycle ergometer, other muscles besides the quadriceps muscle group are working, which affects lactate production. It would be useful to test whether the NIRS threshold is dependent on the location of the monitor [32,33]. This question was answered by Batterson et al. [31], and it was confirmed that breakpoints in muscle O_2 saturation rate (%/min) were not significantly different from LT1 or LT2 at any muscle sites. In response to maximal effort, larger decreases in SmO_2 should be associated with higher levels of physical capacity (Figure 4). Previously, a similar relationship was identified by Okushima et al. [40] and Feldmann et al. [15], confirming that trainees with a higher $\text{VO}_{2\text{Peak}}$ showed a greater decline in SmO_2 during maximal exercise. Therefore, the oxygen uptake capacity between capillaries and skeletal muscle appears to be related to the aerobic capacity of the active muscle.

The selection of recovery duration to evaluate the reoxygenation rate of muscle has a notable practical implication. Our previous study in highly trained speed skaters [13] found that reoxygenation rate showed a significant positive correlation with $\text{VO}_{2\text{max}}$ and exercise capacity in the GXT. In the current study, we also demonstrated a strong positive correlation between the rate of reoxygenation with peak power in the GXT (in females) and a moderate correlation with $\text{VO}_{2\text{max}}$ (in males) (Figures 7 and 8). These correlations offer further evidence that the rate of muscle reoxygenation after a GXT depends, in part, on the aerobic capacity of the participants. In related work, Ichimura et al. [41] noted a faster rate of muscle reoxygenation after a ramp test in those with higher $\text{VO}_{2\text{max}}$ levels.

5. Conclusions

The SmO_2 at the AT, during and after maximal exercise, depends on the training status of the individual. Those participants with a higher physical fitness level showed greater decreases in ΔSmO_2 at the AT level, as well as after maximal exercise. SmO_2 corresponding to the well-established exercise thresholds may be applied to guide training prescription. The rate of muscle reoxygenation after a GXT was also dependent on the aerobic capacity of the participants.

6. Limitations

Two types of cycle ergometers were used in this study. The skaters opted to use their own professional bicycle frames mounted on a Cyclus cycle ergometer to achieve optimal test results. In contrast, students performed the tests on a Lode Corival, which allows for precise positioning that is suitable for amateurs. Notably, the choice of ergometer model did not affect physiological exercise indicators such as HR_{max} , $\text{VO}_{2\text{max}}$, Lactate PEAK, or SmO_2 . Finally, the size of the investigated population might be considered a study

limitation. However, studies including elite athletes are subject to such constraints, as the investigated population remains small.

Author Contributions: Conceptualization, K.R., A.K., B.D. and T.K.; methodology, K.R. and A.K.; software, K.R., A.K. and K.K.; validation, K.R., A.K. and B.D.; formal analysis, K.R., A.K. and T.K.; investigation, K.R., A.K. and P.R.; resources, K.R., A.K., P.R. and K.K.; data curation, K.R. and A.K.; writing—original draft preparation, K.R., A.K. and T.K.; writing—review and editing, K.R. and A.K.; visualization, K.R. and A.K.; supervision, K.R. and A.K.; project administration, K.R. and A.K.; funding acquisition, K.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors report that a small grant (number 102.32) was provided by the Institute of Sport–National Research Institute, Warsaw, for the collection of data, the data analysis, and the preparation of this manuscript.

Institutional Review Board Statement: The research outlined was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and its later amendments, with approval no. KEBN-22-71-KR (date of approval 14 March 2022) from the Research Ethics Committee of Institute of Sport–National Research Institute, Warsaw, Poland.

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

Data Availability Statement: The authors confirm that the data supporting the findings of this study are available within the article and will be made available from the corresponding author on reasonable request. The data (Tables 1 and 2) of the presented study of highly trained female and male speed skaters were partially used in the following publication: Rebiś K., D. Sadowska, M. Starczewski, A. Klusiewicz. Usefulness of portable device to establish differences in muscle oxygenation between the Wingate test and graded exercise test: effect of gender on anaerobic and aerobic capacity in speed skaters. *Front. Physiol.* 2022, 13, 809864. doi: 10.3389/fphys.2022.809864 [13].

Acknowledgments: The authors would like to thank Philip Batterson for his valuable consultations regarding the manuscript's preparation.

Conflicts of Interest: All the authors declare a lack of any conflicts of interest.

References

1. Driller, M.; Borges, N.; Plews, D. Evaluating a New Wearable Lactate Threshold Sensor in Recreational to Highly Trained Cyclists. *Sports Eng.* **2016**, *19*, 229–235. [\[CrossRef\]](#)
2. Crum, E.M.; O'Connor, W.J.; Van Loo, L.; Valckx, M.; Stannard, S.R. Validity and Reliability of the Moxy Oxygen Monitor during Incremental Cycling Exercise. *Eur. J. Sport Sci.* **2017**, *17*, 1037–1043. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Perrey, S.; Ferrari, M. Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Med.* **2018**, *48*, 597–616. [\[CrossRef\]](#)
4. Perrey, S.; Quaresima, V.; Ferrari, M. Muscle Oximetry in Sports Science: An Updated Systematic Review. *Sports Med.* **2024**, *54*, 975–996. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Hamaoka, T. Muscle Oxygenation Monitoring Using Near-Infrared Spectroscopy. *J. Phys. Fit. Sports Med.* **2013**, *2*, 203–207. [\[CrossRef\]](#)
6. Paquette, M.; Bieuzien, F.; Billaut, F. Muscle Oxygenation Rather than VO₂max as a Strong Predictor of Performance in Sprint Canoe–Kayak. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2018**, *13*, 1299–1307. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Hesford, C.; Cardinale, M.; Laing, S.; Cooper, C.E. NIRS Measurements with Elite Speed Skaters: Comparison between the Ice Rink and the Laboratory. *Adv. Exp. Med. Biol.* **2013**, *765*, 81–86. [\[CrossRef\]](#)
8. Piuccio, T.; Soares, R.; Diefenthaler, F.; Millet, G.Y.; Murias, J.M. Oxygen Uptake and Muscle Deoxygenation Kinetics during Skating: Comparison Between Slide-Board and Treadmill Skating. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2018**, *13*, 783–788. [\[CrossRef\]](#)
9. Hesford, C.M.; Laing, S.J.; Cardinale, M.; Cooper, C.E. Asymmetry of Quadriceps Muscle Oxygenation during Elite Short-Track Speed Skating. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2012**, *44*, 501–508. [\[CrossRef\]](#)
10. Hettinga, F.J.; Konings, M.J.; Cooper, C.E. Differences in Muscle Oxygenation, Perceived Fatigue and Recovery between Long-Track and Short-Track Speed Skating. *Front. Physiol.* **2016**, *7*, 619. [\[CrossRef\]](#)
11. Neary, J.P.; McKenzie, D.C.; Bhambhani, Y.N. Effects of Short-Term Endurance Training on Muscle Deoxygenation Trends Using NIRS. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2002**, *34*, 1725–1732. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Paquette, M.; Bieuzien, F.; Billaut, F. Effect of a 3-Weeks Training Camp on Muscle Oxygenation, V̇O₂ and Performance in Elite Sprint Kayakers. *Front. Sports Act. Living* **2020**, *2*, 47. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

13. Rębiś, K.; Sadowska, D.; Starczewski, M.; Klusiewicz, A. Usefulness of Portable Device to Establish Differences in Muscle Oxygenation between the Wingate Test and Graded Exercise Test: Effect of Gender on Anaerobic and Aerobic Capacity in Speed Skaters. *Front. Physiol.* **2022**, *13*, 809864. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Klusiewicz, A.; Rebis, K.; Ozimek, M.; Czaplicki, A. The Use of Muscle Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) to Assess the Aerobic Training Loads of World-Class Rowers. *Biol. Sport* **2021**, *38*, 103571. [\[CrossRef\]](#)
15. Feldmann, A.; Ammann, L.; Gächter, F.; Zibung, M.; Erlacher, D. Muscle Oxygen Saturation Breakpoints Reflect Ventilatory Thresholds in Both Cycling and Running. *J. Hum. Kinet.* **2022**, *83*, 87–97. [\[CrossRef\]](#)
16. Vasquez Bonilla, A.; González-Custodio, A.; Timón, R.; Cardenosa, A.; Camacho-Cardenosa, M.; Olcina, G. Training Zones through Muscle Oxygen Saturation during a Graded Exercise Test in Cyclists and Triathletes. *Biol. Sport* **2023**, *40*, 439–448. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Wang, B.; Xu, G.; Tian, Q.; Sun, J.; Sun, B.; Zhang, L.; Luo, Q.; Gong, H. Differences between the Vastus Lateralis and Gastrocnemius Lateralis in the Assessment Ability of Breakpoints of Muscle Oxygenation for Aerobic Capacity Indices during an Incremental Cycling Exercise. *J. Sports Sci. Med.* **2012**, *11*, 606–613.
18. Borges, N.R.; Driller, M.W. Wearable Lactate Threshold Predicting Device Is Valid and Reliable in Runners. *J. Strength Cond. Res.* **2016**, *30*, 2212–2218. [\[CrossRef\]](#)
19. Cayot, T.E.; Robinson, S.G.; Davis, L.E.; Bender, P.A.; Thistlethwaite, J.R.; Broeder, C.E.; Lauver, J.D. Estimating the Lactate Threshold Using Wireless Near-Infrared Spectroscopy and Threshold Detection Analyses. *Int. J. Exerc. Sci.* **2021**, *14*, 284–294.
20. Keir, D.A.; Iannetta, D.; Mattioni Maturana, F.; Kowalchuk, J.M.; Murias, J.M. Identification of Non-Invasive Exercise Thresholds: Methods, Strategies, and an Online App. *Sports Med.* **2022**, *52*, 237–255. [\[CrossRef\]](#)
21. Perrey, S. Muscle Oxygenation Unlocks the Secrets of Physiological Responses to Exercise: Time to Exploit It in the Training Monitoring. *Front. Sports Act. Living* **2022**, *4*, 864825. [\[CrossRef\]](#)
22. Jamnick, N.A.; Botella, J.; Pyne, D.B.; Bishop, D.J. Manipulating Graded Exercise Test Variables Affects the Validity of the Lactate Threshold and [Formula: See Text]. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0199794. [\[CrossRef\]](#)
23. Newell, J.; Higgins, D.; Madden, N.; Cruickshank, J.; Einbeck, J.; McMillan, K.; McDonald, R. Software for Calculating Blood Lactate Endurance Markers. *J. Sports Sci.* **2007**, *25*, 1403–1409. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Sanders, D.; Taylor, R.J.; Myers, T.; Akubat, I. A Field-Based Cycling Test to Assess Predictors of Endurance Performance and Establishing Training Zones. *J. Strength Cond. Res.* **2020**, *34*, 3482–3488. [\[CrossRef\]](#)
25. Hecksteden, A.; Kraushaar, J.; Scharhag-Rosenberger, F.; Theisen, D.; Senn, S.; Meyer, T. Individual Response to Exercise Training—A Statistical Perspective. *J. Appl. Physiol.* **2015**, *118*, 1450–1459. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Foster, C.; Snyder, A.; Welsh, R. Monitoring of Training, Warm Up, and Performance in Athletes. In *Overload, Performance Incompetence, and Regeneration in Sport*; Lehmann, M., Foster, C., Gastmann, U., Keizer, H., Steinacker, J.M., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 1999; pp. 43–51, ISBN 978-0-585-34048-7.
27. Nagasawa, T. Slower Recovery Rate of Muscle Oxygenation after Sprint Exercise in Long-Distance Runners Compared with That in Sprinters and Healthy Controls. *J. Strength Cond. Res.* **2013**, *27*, 3360–3366. [\[CrossRef\]](#)
28. Overstreet, B.S.; Bassett, D.R.J.; Crouter, S.E.; Rider, B.C.; Parr, B.B. Portable Open-Circuit Spirometry Systems. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2017**, *57*, 227–237. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Kuipers, H.; Verstappen, F.T.J.; Keizer, H.A.; Geurten, P.; van Kranenburg, G. Variability of Aerobic Performance in the Laboratory and Its Physiologic Correlates. *Int. J. Sports Med.* **1985**, *6*, 197–201. [\[CrossRef\]](#)
30. McCully, K.K.; Iotti, S.; Kendrick, K.; Wang, Z.; Posner, J.D.; Leigh, J.; Chance, B. Simultaneous in Vivo Measurements of HbO₂ Saturation and PCr Kinetics after Exercise in Normal Humans. *J. Appl. Physiol.* **1994**, *77*, 5–10. [\[CrossRef\]](#)
31. Batterson, P.M.; Kirby, B.S.; Hasselmann, G.; Feldmann, A. Muscle Oxygen Saturation Rates Coincide with Lactate-Based Exercise Thresholds. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2023**, *123*, 2249–2258. [\[CrossRef\]](#)
32. Farzam, P.; Starkweather, Z.; Franceschini, M.A. Validation of a Novel Wearable, Wireless Technology to Estimate Oxygen Levels and Lactate Threshold Power in the Exercising Muscle. *Physiol. Rep.* **2018**, *6*, e13664. [\[CrossRef\]](#)
33. Raleigh, C.; Donne, B.; Fleming, N. Association between Different Non-Invasively Derived Thresholds with Lactate Threshold during Graded Incremental Exercise. *Int. J. Exerc. Sci.* **2018**, *11*, 391–403. [\[PubMed\]](#)
34. McMorries, R.M.; Joubert, D.P.; Jones, E.J.; Faries, M.D. A Validation Study of a Noninvasive Lactate Threshold Device. *Int. J. Exerc. Sci.* **2019**, *12*, 221–232. [\[PubMed\]](#)
35. Seiler, S. What Is Best Practice for Training Intensity and Duration Distribution in Endurance Athletes? *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2010**, *5*, 276–291. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Grassi, B.; Quaresima, V.; Marconi, C.; Ferrari, M.; Cerretelli, P. Blood Lactate Accumulation and Muscle Deoxygenation during Incremental Exercise. *J. Appl. Physiol.* **1999**, *87*, 348–355. [\[CrossRef\]](#)
37. Caen, K.; Boone, J. Response to Goulding et al. (2022): Are Whole-Body and Local Thresholds Mechanistically Linked? *Eur. J. Appl. Physiol.* **2023**, *123*, 421–422. [\[CrossRef\]](#)
38. Goulding, R.P.; Marwood, S.; Lei, T.-H.; Okushima, D.; Poole, D.C.; Barstow, T.J.; Kondo, N.; Koga, S. Time to Retire the Notion That Local and Whole-Body Exercise Thresholds Are Mechanistically Linked? *Eur. J. Appl. Physiol.* **2023**, *123*, 419–420. [\[CrossRef\]](#)
39. Davis, P.R.; Yakel, J.P.; Anderson, D.J.F. Muscle Oxygen Demands of the Vastus Lateralis in Back and Front Squats. *Int. J. Exerc. Sci.* **2020**, *13*, 734–743.

40. Okushima, D.; Poole, D.C.; Barstow, T.J.; Rossiter, H.B.; Kondo, N.; Bowen, T.S.; Amano, T.; Koga, S. Greater VO₂peak Is Correlated with Greater Skeletal Muscle Deoxygenation Amplitude and Hemoglobin Concentration within Individual Muscles during Ramp-Incremental Cycle Exercise. *Physiol. Rep.* **2016**, *4*, e13065. [[CrossRef](#)]
41. Ichimura, S.; Murase, N.; Osada, T.; Kime, R.; Homma, T.; Ueda, C.; Nagasawa, T.; Motobe, M.; Hamaoka, T.; Katsumura, T. Age and Activity Status Affect Muscle Reoxygenation Time after Maximal Cycling Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2006**, *38*, 1277–1281. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

Transferability of Exercise Intensity Based on Muscle Oxygenation from Normoxia to Hypoxia in Ski-Mountaineering Athletes—Exploratory Study

Kinga Rebiś ^{1,*} , Tomasz Kowalski ¹ , Kamil Michalik ²  and Andrzej Klusiewicz ³¹ Department of Physiology, Institute of Sport—National Research Institute, 01-982 Warsaw, Poland² Faculty of Physical Education and Sport, Wrocław University of Health and Sport Sciences, 51-612 Wrocław, Poland³ Department of Physical Education and Health in Białą Podlaską, Faculty in Białą Podlaską, Józef Piłsudski University of Physical Education, 00-968 Warsaw, Poland

* Correspondence: kinga.rebis@insp.pl

Abstract: Frequent changes in altitude and oxygen levels limit the practical application of traditionally derived exercise thresholds or training zones based on heart rate (HR) or blood lactate concentration (bLa). We investigated the transferability of a muscle oxygenation (SmO₂)-based intensity prescription between different hypoxic conditions to assess the suitability of real-time SmO₂ measurements for ski-mountaineering (SKIMO) athletes during submaximal endurance exercise. A group of 15 well-trained male SKIMO athletes performed a graded-intensity run test in normoxia (87 m ASL, FiO₂ = 20.8%) to determine the anaerobic threshold (AnT) with the mod-Dmax method, and maximal lactate steady state (MLSS) assessments in acute normobaric hypoxia (3000 m ASL, FiO₂ = 14.4%) with the intensity aligned to 90–105% of SmO₂ at the normoxia-determined AnT. SmO₂, HR, and bLa were monitored during both tests. The number of MLSS assessments without a bLa increase over 1 mmol·L^{−1} was reported. Paired *t*-tests with Cohen's *d* effect sizes and intraclass correlation coefficient (ICC) were computed to compare the bLa and HR at the AnT in normoxia and MLSS averages in hypoxia, as both corresponded to equivalent SmO₂. Out of the 15 MLSS assessments, 11 (73.3%) were performed without a bLa increase over 1 mmol·L^{−1}. Significant differences at equivalent SmO₂ in normoxia and hypoxia were found for HR (175 ± 11.7 vs. 160 ± 14.2 bpm, *p* = 0.005, *d* = 1.02), but not for bLa (4.9 ± 1.2 vs. 5.1 ± 2.4 mmol·L^{−1}, *p* = 0.845, *d* = −0.05). ICC(2,k) for HR and bLa were 0.56 (95% CI: −0.24, 0.85) and 0.40 (95% CI: −0.75, 0.80), respectively. The results indicate a fair transferability of a SmO₂-based intensity prescription between different hypoxic conditions in well-trained SKIMO athletes during submaximal endurance exercise. The practical significance of the observations depends on the required accuracy of the exercise intensity determination.



Citation: Rebiś, K.; Kowalski, T.; Michalik, K.; Klusiewicz, A. Transferability of Exercise Intensity Based on Muscle Oxygenation from Normoxia to Hypoxia in Ski-Mountaineering Athletes—Exploratory Study. *Sports* **2024**, *12*, 351. <https://doi.org/10.3390/sports12120351>

Academic Editors: Nicolas Berger and Russ Best

Received: 6 November 2024

Revised: 11 December 2024

Accepted: 17 December 2024

Published: 18 December 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: near-infrared spectroscopy; NIRS; hypoxia; exercise testing; anaerobic threshold; SKIMO

1. Introduction

Ski-mountaineering (SKIMO) is an endurance winter sport that combines skiing and mountaineering. As the participants ascend and descend snow-covered mountains, continuous effort in various hypoxic conditions is required. It is a rapidly growing discipline worldwide and has been included in the program for the Winter Olympic Games starting in 2026 [1,2]. Physiologically, the effort involved in SKIMO can be compared to cycling time-trial on a hilly route, running a 10 km race, or cross-country skiing. Therefore, SKIMO is one of the most physically demanding sports [3]. SKIMO may be described as a technical discipline with a significant endurance component, engaging both anaerobic and aerobic energy systems to varying degrees [4,5]. As a result, due to the mountain environment, altitude, and the significant role of technique in both climbing and descending, it is a discipline where assessing physical performance and monitoring training is particularly

challenging [1]. Another factor complicating the analysis of training loads and the determination of training intensity zones is that a competition takes place in high mountains, with a variable hypoxic component. In a single race, participants may climb over 4000 m in elevation, repeatedly ascending above 3000 m above sea level [6]. A literature review shows a need for more detailed analyses, especially among elite SKIMO athletes, which is why new solutions are still being sought that could serve as tools to support the training process [1,3]. The specificity of SKIMO is linked to competitions being held at altitudes above 2000 m above sea level. Another important factor is the altitude change during the competition—athletes often move multiple times between zones ranging from 2000 to 3000 m above sea level, up to zones above 3000 m [6]. The complex physiological demands of SKIMO create a methodological challenge in selecting the most appropriate performance indicators to describe race intensity [3].

Traditionally, training zones and exercise thresholds are usually determined by heart rate (HR), pace, or blood lactate concentration (bLa) [7]. However, these indices may exhibit different values during exercise in hypoxia compared to at sea level [8–10]. In hypoxic conditions, oxygen uptake is typically reduced during both submaximal and maximal exercise due to the diminished partial pressure of oxygen, which limits oxygen availability for muscular work [11]. This reduction usually impairs exercise performance and leads to an earlier onset of fatigue [12]. To compensate, heart rate increases significantly at a given workload compared to normoxia, as the cardiovascular system attempts to maintain oxygen delivery to active muscles [11]. Furthermore, at a corresponding workload bLa may be higher in moderate hypoxia, reflecting an increased reliance on anaerobic glycolysis to meet energy demands in the face of limited oxygen availability during submaximal intensity. These physiological changes highlight the body's adaptive responses to maintain energy production under hypoxic stress [13]. At the same time, adapted and trained individuals under high hypoxia may present a lower peak bLa, especially in association with high-intensity exercise [14].

These physiological changes may affect the comparability of laboratory measurements obtained under normoxic conditions, limiting their real-world applicability in the field. Such limitations are particularly noteworthy in disciplines that require performing in constantly changing conditions, such as SKIMO in the context of variable altitude and exercise intensity. Therefore, alternative methods of assessing exercise intensity and prescribing training are being sought.

As the traditional methods for assessing SKIMO performance and exercise intensity exhibit significant limitations, new approaches are still being explored. One of the modern tools that has gained popularity in training practice in recent years is mobile measurement devices utilizing near-infrared spectroscopy (NIRS). This technology allows for monitoring local muscle oxygenation saturation (SmO_2) [15]. It was successfully applied in both normoxia and hypoxia in state-of-the-art research [16–18]. The reports on the SmO_2 kinetics in hypoxia during exercise are scarce and not conclusive. For example, Solsona et al. (2022) observed that SmO_2 might be similar across different hypoxic conditions with a decrease in total work [19] during sprint interval training. Pramkratok et al. (2022) also reported stable SmO_2 levels during incremental running tests with impaired performance in hypoxia [20]. On the contrary, Rodriguez et al. (2019) noted that locomotor muscle oxygenation was reduced, whilst oxygenation of respiratory muscles was maintained in hypoxia during repeated sprint efforts [21]. Noteworthy, both the applied exercise types and the population in the available research differ vastly. It may suggest that the SmO_2 kinetics depend on the exercise intensity, modality, participants' fitness level, or applied research methodology. Consequently, further and more specific research is required. According to the literature data and recent investigations, NIRS measurements allow for both assessing maximal exercise capacity and determining training intensity zones from an incremental exercise test [22,23]. Furthermore, analyzing the dynamics of SmO_2 changes during exercise enables the determination of individualized training zones and intensity thresholds [23]. Noteworthy, the available research focuses on measurements performed

in the same conditions [24,25], and the application of such an approach during endurance efforts in various hypoxic conditions remains understudied. This might be one of the first investigations addressing such an application of NIRS in outdoor winter sports, conducted on well-trained athletes.

We hypothesized that NIRS-based measurements may optimize for the transfer of laboratory test results, conducted in normoxia, to hypoxic conditions. Additionally, we speculated that the proposed training zones should remain stable regardless of altitude, unlike traditional training zones based on HR, pace, or bLa. Therefore, we investigated the transferability of SmO₂-based intensity prescription between different hypoxic conditions to assess the suitability of real-time SmO₂ measurements for SKIMO athletes during submaximal endurance exercise.

2. Materials and Methods

The study design was reviewed and approved by the Institute of Sport—National Research Institute Ethics Committee (approval no KEBN-24-97-KR). All procedures are aligned with the Declaration of Helsinki. All study participants provided written consent to take part in the experiment.

2.1. Participants

A group of male SKIMO athletes ($n = 15$) completed the study. The participants were classified as either Tier 3 or Tier 4 athletes according to the participant classification framework [26], indicating they were trained or highly trained athletes. The inclusion criteria required participants to have a valid medical certificate for SKIMO training and competition, be classified in Tier 3 or Tier 4 as defined by McKay et al. (2002), and have at least 4 years of competitive athletic training. Exclusion criteria included any chronic or acute medical conditions within the past 3 months and the current use of medication. The recruitment was based on convenience sampling through the Polish National Team coaches. The required sample size was calculated with G* Power (version 3.1.9.2; Dusseldorf, Germany) and totaled 15 participants. The following input parameters were set as follows: effect size = 0.8, significance $\alpha = 0.05$, and power ($1 - \beta$) = 0.8. Initially, 18 athletes enrolled, but only 15 completed all the necessary procedures and were included in the analyses. The participants' characteristics are presented in Table 1.

Table 1. Baseline participant characteristics.

Variable	Value (Mean $\pm$ Standard Deviation)
Age (years)	29.7 $\pm$ 11.5
Body mass (kg)	71.4 $\pm$ 4.3
Body height (cm)	179.1 $\pm$ 7.5
VO ₂ max (mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹) ¹	60.9 $\pm$ 8.1
Body mass (kg)	71.4 $\pm$ 4.3

¹ VO₂max—maximal oxygen uptake.

The participants' height was measured with the free-standing digital stadiometer seca 274 (seca GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany). Their body mass was measured with the body composition analyzer InBody 770 (InBodyUSA, Cerritos, CA, USA). Maximum oxygen uptake (VO₂max) was established during a graded-intensity run test. The gasometry was performed with the Cortex Metamax B3 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany), breath-by-breath method, according to the manufacturer's guidelines. All the included participants fulfilled the maximal effort criteria: (1) HR $\leq$ 10 beats/min or $\leq$ 5% of the age-predicted (220-age) maximum, (2) bLa $\geq$ 8 mmol/L, and (3) respiratory exchange ratio > 1.10 [27]. The highest average oxygen uptake for 30 s was considered as the VO₂max.

2.2. Study Design

Across 10 days the athletes took part in two testing procedures to determine the transition between heavy and severe exercise domains. First, the participants performed a graded-intensity run test on a treadmill (h/p/cosmos Saturn treadmill, h/p/cosmos sports & medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Germany) in normoxia (87 m ASL, $\text{FiO}_2 = 20.8\%$). The test was conducted to exhaustion, with a 4 min step protocol and capillary blood sampling for bLa after each step. The anaerobic threshold (AnT) with the mod-Dmax method was established for HR, bLa, and SmO_2 [28]. The following week, the participants performed maximal lactate steady state (MLSS) run assessments in acute normobaric hypoxia (3000 m ASL, $\text{FiO}_2 = 14.4\%$) with the intensity aligned to 90–105% of SmO_2 at the normoxia-determined AnT. The 15% range for SmO_2 reflected the constant acute changes of the measurement and resembled a training zone that may be practically used in training. The MLSS assessment was based on three 10 min efforts with a 1 min recovery interval. The speed and incline were self-adjusted by participants to keep the intensity in the prescribed SmO_2 range. The average HR was measured during the last minute of each effort and the bLa was measured immediately after each effort. Hypoxic conditions in the laboratory were generated using the Airzone normobaric hypoxia system (Air Sport, Międzyzdroje, Poland), with the hypoxic chamber measuring ca 45 m². Temperature, humidity, oxygen, and carbon dioxide concentrations were controlled and held constant.

SmO_2 was measured with a Moxy monitor (Moxy Monitors, Hutchinson, MI, USA), previously validated and widely applied in sports settings [29]. The device was placed on the right vastus lateralis, about 13 ± 1 cm above the upper edge of the patella and 4 ± 1 cm to the side of the thigh's midline. A nontransparent tape of 7.5 cm width was used to provide a repeatable testing environment and hypoallergenic skin tape was used to fix devices to the skin. A computation window of 2 s was used. Skinfold thickness at this location was measured using a Harpenden Skinfold Caliper (Baty International, Burgess Hill, United Kingdom). The recorded values (5.3 ± 1.3 mm) ensured physiologically reliable SmO_2 measurements [30]. HR was measured with a Polar H10 chest strap (Polar Electro Oy, Helsinki, Finland). Blood samples were taken from the fingertip into 20 μL capillary tubes and immediately analyzed with a Super GL 2 (Dr. Müller Gerätebau GmbH, Freital, Germany) for the bLa.

2.3. Statistical Analysis

The number and percentage of MLSS assessments without a bLa increase over $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ was reported. The normality of the distribution was assessed with the Shapiro–Wilk test and visual analysis of the plot figures. Scatter plots were analyzed for independence of observations, linearity, and outliers. Paired *t*-tests with Cohen's *d* effect sizes and intraclass correlation coefficient (ICC) were computed to compare bLa and HR at AnT in normoxia and MLSS averages in hypoxia, as both corresponded to equivalent SmO_2 . Bland–Altman plots were presented to visualize the agreement between both measurements. All statistical analyses and adequate figures were prepared using the JASP Team statistical package JASP (JASP Team, Amsterdam, The Netherlands, Version 0.17.2).

3. Results

Out of the 15 MLSS assessments, 11 (73.3%) were performed without a bLa increase over $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Statistically significant differences at equivalent SmO_2 in normoxia and hypoxia were found for the HR (175 ± 11.7 vs. 160 ± 14.2 bpm, $p = 0.005$, $d = 1.02$), but not for the bLa (4.9 ± 1.2 vs. $5.1 \pm 2.4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, $p = 0.845$, $d = -0.05$). ICC(2,k) for the HR and bLa were 0.56 (95% CI: $-0.24, 0.85$) and 0.40 (95% CI: $-0.75, 0.80$), respectively. The Bland–Altman plots to visualize the agreement between the measurements are presented as Figures 1 and 2.

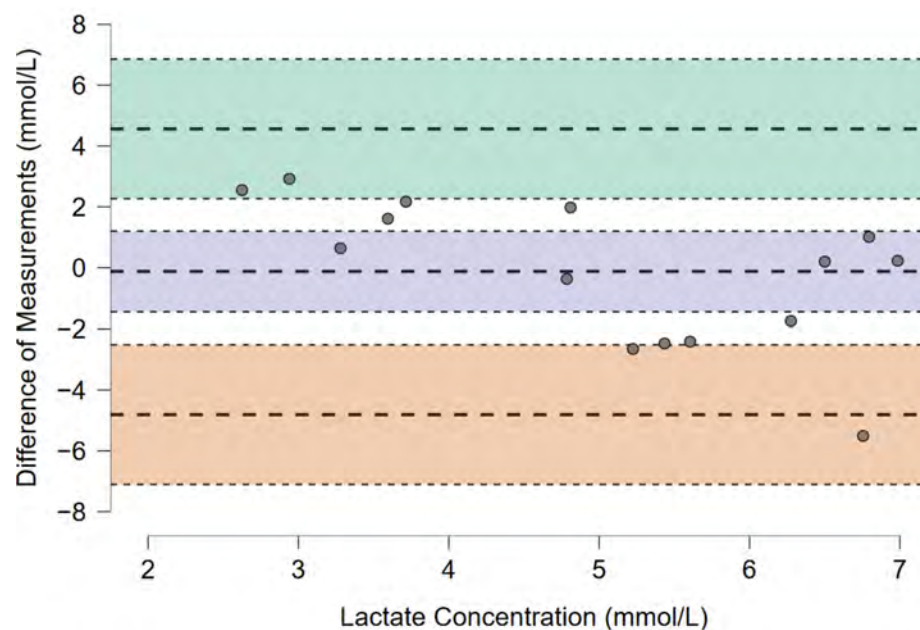


Figure 1. The Bland–Altman plot presents an agreement between the bLa at AnT in normoxia and the MLSS averages in hypoxia (both corresponded to equivalent SmO_2).

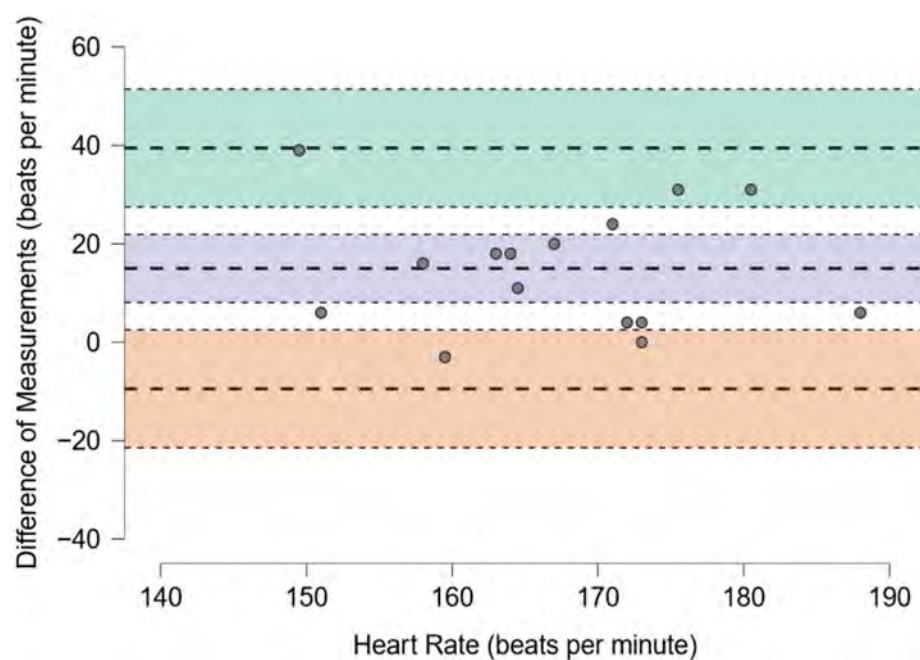


Figure 2. The Bland–Altman plot presents an agreement between the HR at AnT in normoxia and the MLSS averages in hypoxia (corresponded to equivalent SmO_2).

4. Discussion

Our study investigated the transferability of SmO_2 -based intensity prescription between different hypoxic conditions in well-trained SKIMO athletes during submaximal endurance exercise. This is a critical area of research as traditional methods for prescribing exercise intensity, such as HR, pace, or bLa, are known to be influenced by altitude, potentially leading to inaccurate exercise intensity prescriptions. To our knowledge, this is the first study exploring the application of NIRS-based indices in different conditions. The results indicate that SmO_2 -based intensity prescription demonstrates a fair transferability between normoxic and hypoxic conditions within intensities close to the transition between the heavy and severe exercise domains. Our findings suggest that SmO_2 , measured with

portable NIRS devices, may offer a fairly stable and reliable method for setting training zones across varying altitudes during submaximal endurance exercise. This is crucial for optimizing training adaptations and racing strategies in SKIMO athletes who frequently train and compete at altitude.

Since the introduction of the equilibrium principle to lactate production and clearance [31], numerous studies have explored MLSS, using a variety of equipment, exercise modalities, movement patterns, muscle groups, and endurance performance measures [32]. Although the precise definition and interpretation of MLSS vary, many authors have referred to the MLSS as the AnT because it represents an exercise intensity that can be sustained without significant reliance on anaerobic metabolism [33]. Generally, a close relationship between traditional exercise thresholds and MLSS suggests validity concerning the training intensity prescription [33]. However, multiple scientists reported only a loose correlation between MLSS and bLa-derived exercise thresholds [34,35]. De Souza et al. (2012) reported moderate to high correlations ($r = 0.68$ and $r = 0.79$) between MLSS and aerobic or anaerobic thresholds, respectively [34]. Urhausen et al. (1993) reported that bLa increased continuously and/or led to a premature break-off during the 'quasi-MLSS' protocol in 15 out of 30 cases [35]. Aunola and Rusko (1992) reported that AnT and MLSS are correlated ($r = 0.83$); however, no correlation between the 4 mmol lactate threshold and MLSS was observed [36]. Interestingly, Smith and Jones (2001) found no significant differences between MLSS velocity and lactate turnpoint velocity but noted that the extent of disagreement is too great to estimate one variable accurately from another in individual subjects [37]. Hoogeveen et al. (1997) also reported the conspicuous individual variability of bLa at MLSS in well-trained endurance athletes [38]. During our investigation, 73.3% of MLSS assessments were performed without a bLa increase over $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and no significant differences between the bLa in normoxia and hypoxia were found. Considering the presented context, the approach investigated in our study seems promising.

The practical significance of our observations depends on the needed accuracy of the exercise intensity determination. Typically, very high precision is required in performance-oriented environments [39], whereas applied population approaches to accuracy and repeatability are often less demanding [40,41]. Hence, fair transferability between normoxic and hypoxic conditions may be sufficient to play a role in limiting acute mountain sickness in the general tourist population at moderate altitudes, as high-intensity exercise may exaggerate arterial hypoxemia leading to a higher prevalence of negative altitude symptoms [42]. At the same time, fair transferability may seem not enough for world-class athletes and coaches, as precise and calculated training models are desired in high-performance environments [39].

4.1. Practical Implications for Endurance Exercise

Compared to bLa measurements, SmO₂ monitoring offers several advantages for prescribing exercise intensity, such as real-time data availability. NIRS technology allows for non-invasive, continuous monitoring of SmO₂ during exercise, providing real-time feedback on SmO₂ dynamics that reflect exercise intensity [24]. State-of-the-art NIRS devices typically involve a small wearable sensor, that transmits data wirelessly to a sports watch or smartphone app [43]. This technology eliminates the need for cumbersome equipment and frequent blood sampling, making SmO₂ monitoring practical and accessible for both laboratory and field-based assessments [44]. Commercial NIRS devices are portable and mobile, allowing for continuous data collection even in challenging outdoor environments like those encountered in SKIMO. The integration of these wearable devices with existing training platforms and software further enhances data analysis and interpretation, allowing for individualized training prescriptions and real-time feedback for athletes.

The practical implications of our findings are significant for SKIMO athletes and their coaches. By adopting a SmO₂-based intensity prescription, they could potentially benefit from the following:

- Optimize training adaptations. SKIMO athletes could train at more precise and consistent intensities across different altitudes, maximizing physiological adaptations specific to SKIMO performance.
- Individualize training prescription. SKIMO athletes could utilize real-time SmO_2 data to tailor training loads, techniques, and recovery strategies based on individual athlete responses to training and environmental conditions.
- Monitor training load and fatigue. SKIMO athletes could track changes in SmO_2 over time to assess training adaptations, identify early signs of fatigue, and potentially reduce the risk of overtraining.

However, the proposed approach should be applied with caution, as high individual variability concerning NIRS-obtained indices has been reported [45]. Noteworthy, the presented approach might be successfully used in other sports disciplines that compete in different hypoxic conditions or rely on altitude training in their preparations.

4.2. Study Limitations and Future Research

The study design is associated with the exploratory character of our investigation and therefore is not free from limitations. First, the sample size was relatively small and included only male ski-mountaineers. Next, the compared variables have applied character and the direct juxtaposition of the same protocols in normoxia and hypoxia is lacking. Finally, the research addressed a homogeneous group of well-trained endurance athletes that regularly train and compete in hypoxia; therefore, our findings should not be extrapolated to different populations, i.e., recreationally active tourists. Consequently, future research might address efforts with different characteristics (i.e., long in duration and low in intensity) or groups of different genders and training statuses. Our study addressed the intensities close to the transition between heavy and severe exercise domains and should be validated with different work rates. Since substantial individual variability in analyzed indices was observed, it is important to explain the sources and relationships associated with described intra-subject divergence. Moreover, other modalities such as cycling or cross-country skiing should be explored since significant differences between exercise types might appear [46]. Furthermore, the findings should be translated into clear and actionable guidelines for coaches and athletes based on out-of-the-laboratory measurements. Preferably, the testing environment should reflect the training and racing conditions [47] to further optimize the implementation of SmO_2 -based training prescriptions.

5. Conclusions

Our findings indicate that a SmO_2 -based intensity prescription demonstrates a fair transferability between normoxic and hypoxic conditions during submaximal endurance exercise. While traditional methods remain relevant, incorporating SmO_2 monitoring may provide a more nuanced and potentially more accurate approach to training prescription, particularly for individuals exercising, training, or competing in various hypoxic environments.

Author Contributions: K.R.: conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, project administration, funding acquisition, resources, writing—original draft, writing—review, and editing, T.K.: conceptualization, investigation, writing—original draft, writing—review, and editing, K.M.: methodology, writing—original draft, writing—review, and editing, A.K.: supervision, resources, writing—review, and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The study was supported by the Ministry of Sport and Tourism, Poland, under grant number 2023.0252/DSW.

Institutional Review Board Statement: The research outlined was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and its later amendments, with approval no. KEBN-24-97-KR (date of approval 3 July 2024) from the Research Ethics Committee of Institute of Sport—National Research Institute, Warsaw, Poland.

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

Data Availability Statement: Data will be made available upon reasonable request to the corresponding author (K.R.).

Acknowledgments: The authors wish to thank all the participants for their engagement in the study, and the Institute of Sport—National Research Institute technical team for their assistance. Grammarly App and ChatGPT 4.0 were used only for linguistic accuracy and clarity. Preliminary findings from the study were already presented at the 29th Annual Congress of the European College of Sport Science in Glasgow, 2024.

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

References

1. Bortolan, L.; Savoldelli, A.; Pellegrini, B.; Modena, R.; Sacchi, M.; Holmberg, H.-C.; Supej, M. Ski Mountaineering: Perspectives on a Novel Sport to Be Introduced at the 2026 Winter Olympic Games. *Front. Physiol.* **2021**, *12*, 737249. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Faiss, R.; von Orelli, C.; Dériaz, O.; Millet, G.P. Responses to Exercise in Normobaric Hypoxia: Comparison of Elite and Recreational Ski Mountaineers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2014**, *9*, 978–984. [\[CrossRef\]](#)
3. Sunde, A.; Christoffersen, F.; Johansen, J.-M.; Støren, Ø. Steeper or Faster? Tactical Dispositions to Minimize Oxygen Cost in Ski Mountaineering. *Front. Sports Act. Living* **2021**, *3*, 828389. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Wagner, C.-M.; Röhrs, D.; Sandbakk, Ø.; Katz, A.; Wittke, A.; Keiner, M. Performance-Determining Variables of a Simulated Skimo Sprint Competition in Elite Junior Skimo Athletes. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 1882. [\[CrossRef\]](#)
5. Menz, V.; Niedermeier, M.; Stehle, R.; Mugele, H.; Faulhaber, M. Assessment of Maximal Aerobic Capacity in Ski Mountaineering: A Laboratory-Based Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 7002. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Duc, S.; Cassirame, J.; Durand, F. Physiology of Ski Mountaineering Racing. *Int. J. Sports Med.* **2011**, *32*, 856–863. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Jamnick, N.A.; Pettitt, R.W.; Granata, C.; Pyne, D.B.; Bishop, D.J. An Examination and Critique of Current Methods to Determine Exercise Intensity. *Sports Med.* **2020**, *50*, 1729–1756. [\[CrossRef\]](#)
8. Koistinen, P.; Takala, T.; Martikkala, V.; Leppäluoto, J. Aerobic Fitness Influences the Response of Maximal Oxygen Uptake and Lactate Threshold in Acute Hypobaric Hypoxia. *Int. J. Sports Med.* **1995**, *16*, 78–81. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
9. Engelen, M.; Porszasz, J.; Riley, M.; Wasserman, K.; Maehara, K.; Barstow, T.J. Effects of Hypoxic Hypoxia on O₂ Uptake and Heart Rate Kinetics during Heavy Exercise. *J. Appl. Physiol.* **1996**, *81*, 2500–2508. [\[CrossRef\]](#)
10. Beever, A.T.; Zhuang, A.Y.; Murias, J.M.; Aboodarda, S.J.; MacInnis, M.J. Effects of Acute Simulated Altitude on the Maximal Lactate Steady State in Humans. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* **2024**, *327*, R195–R207. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Xu, F.; Rhodes, E.C. Oxygen Uptake Kinetics during Exercise. *Sports Med.* **1999**, *27*, 313–327. [\[CrossRef\]](#)
12. Wehrlin, J.P.; Hallén, J. Linear Decrease in VO₂max and Performance with Increasing Altitude in Endurance Athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2006**, *96*, 404–412. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Park, H.-Y.; Kim, J.-W.; Nam, S.-S. Metabolic, Cardiac, and Hemorheological Responses to Submaximal Exercise under Light and Moderate Hypobaric Hypoxia in Healthy Men. *Biology* **2022**, *11*, 144. [\[CrossRef\]](#)
14. Hochachka, P.W.; Beatty, C.L.; Burelle, Y.; Trump, M.E.; McKenzie, D.C.; Matheson, G.O. The Lactate Paradox in Human High-Altitude Physiological Performance. *News Physiol. Sci.* **2002**, *17*, 122–126.
15. Perrey, S.; Quaresima, V.; Ferrari, M. Muscle Oximetry in Sports Science: An Updated Systematic Review. *Sports Med.* **2024**, *54*, 975–996. [\[CrossRef\]](#)
16. Bourdillon, N.; Mollard, P.; Letournel, M.; Beaudry, M.; Richalet, J.-P. Interaction between Hypoxia and Training on NIRS Signal during Exercise: Contribution of a Mathematical Model. *Respir. Physiol. Neurobiol.* **2009**, *169*, 50–61. [\[CrossRef\]](#)
17. Scheeren, T.W.L.; Schober, P.; Schwarte, L.A. Monitoring Tissue Oxygenation by near Infrared Spectroscopy (NIRS): Background and Current Applications. *J. Clin. Monit. Comput.* **2012**, *26*, 279–287. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Albertus-Cámara, I.; Paredes-Ruiz, M.-J.; Martínez-González-Moro, I. Analysis of Muscle Oxygenation after a Normobaric Hypoxia Tolerance Test. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* **2024**, *9*, 86. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
19. Solsona, R.; Deriaz, R.; Borrani, F.; Sanchez, A.M.J. Muscle Deoxygenation Rates and Reoxygenation Modeling during a Sprint Interval Training Exercise Performed under Different Hypoxic Conditions. *Front. Physiol.* **2022**, *13*, 864642. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
20. Pramkratok, W.; Songsupap, T.; Yimlamai, T. Repeated Sprint Training under Hypoxia Improves Aerobic Performance and Repeated Sprint Ability by Enhancing Muscle Deoxygenation and Markers of Angiogenesis in Rugby Sevens. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2022**, *122*, 611–622. [\[CrossRef\]](#)
21. Rodriguez, R.F.; Townsend, N.E.; Aughey, R.J.; Billaut, F. Respiratory Muscle Oxygenation Is Not Impacted by Hypoxia during Repeated-Sprint Exercise. *Respir. Physiol. Neurobiol.* **2019**, *260*, 114–121. [\[CrossRef\]](#)
22. Rebiś, K.; Sadowska, D.; Starczewski, M.; Klusiewicz, A. Usefulness of Portable Device to Establish Differences in Muscle Oxygenation between the Wingate Test and Graded Exercise Test: Effect of Gender on Anaerobic and Aerobic Capacity in Speed Skaters. *Front. Physiol.* **2022**, *13*, 809864. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
23. Sendra-Pérez, C.; Sanchez-Jimenez, J.L.; Marzano-Felisatti, J.M.; Encarnación-Martínez, A.; Salvador-Palmer, R.; Priego-Quesada, J.I. Reliability of Threshold Determination Using Portable Muscle Oxygenation Monitors during Exercise Testing: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 12649. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

24. Rebiś, K.; Klusiewicz, A.; Długolecka, B.; Róžański, P.; Kowieski, K.; Kowalski, T. Estimation of Lactate Thresholds, Aerobic Capacity and Recovery Rate from Muscle Oxygen Saturation in Highly Trained Speed Skaters and Healthy Untrained Individuals. *J. Clin. Med.* **2024**, *13*, 5340. [\[CrossRef\]](#)
25. Possamai, L.T.; Borszcz, F.K.; de Aguiar, R.A.; de Lucas, R.D.; Turnes, T. Comparison of NIRS Exercise Intensity Thresholds with Maximal Lactate Steady State, Critical Power and Rowing Performance. *Biol. Sport* **2024**, *41*, 123–130. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. McKay, A.K.A.; Stellingwerff, T.; Smith, E.S.; Martin, D.T.; Mujika, I.; Goosey-Tolfrey, V.L.; Sheppard, J.; Burke, L.M. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2022**, *17*, 317–331. [\[CrossRef\]](#)
27. Poole, D.C.; Jones, A.M. Measurement of the Maximum Oxygen Uptake Vo2max: Vo2peak Is No Longer Acceptable. *J. Appl. Physiol.* **2017**, *122*, 997–1002. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Fabre, N.; Balestreri, F.; Pellegrini, B.; Schena, F. The Modified Dmax Method Is Reliable to Predict the Second Ventilatory Threshold in Elite Cross-Country Skiers. *J. Strength Cond. Res.* **2010**, *24*, 1546–1552. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Feldmann, A.; Schmitz, R.; Erlacher, D. Near-Infrared Spectroscopy-Derived Muscle Oxygen Saturation on a 0% to 100% Scale: Reliability and Validity of the Moxy Monitor. *J. Biomed. Opt.* **2019**, *24*, 115001. [\[CrossRef\]](#)
30. McManus, C.J.; Collison, J.; Cooper, C.E. Performance Comparison of the MOXY and PortaMon near-Infrared Spectroscopy Muscle Oximeters at Rest and during Exercise. *J. Biomed. Opt.* **2018**, *23*, 015007. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
31. Heck, H.; Mader, A.; Hess, G.; Mücke, S.; Müller, R.; Hollmann, W. Justification of the 4-Mmol/L Lactate Threshold. *Int. J. Sports Med.* **1985**, *6*, 117–130. [\[CrossRef\]](#)
32. Smekal, G.; von Duvillard, S.P.; Pokan, R.; Hofmann, P.; Braun, W.A.; Arciero, P.J.; Tschann, H.; Wonisch, M.; Baron, R.; Bachl, N. Blood Lactate Concentration at the Maximal Lactate Steady State Is Not Dependent on Endurance Capacity in Healthy Recreationally Trained Individuals. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2012**, *112*, 3079–3086. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
33. Faude, O.; Kindermann, W.; Meyer, T. Lactate Threshold Concepts: How Valid Are They? *Sports Med.* **2009**, *39*, 469–490. [\[CrossRef\]](#)
34. De Souza, K.M.; Grossl, T.; Babel Junior, R.J.; De Lucas, R.D.; Costa, V.P.; Guglielmo, L.G.A. Máximo Estado Estável de Lactato Estimado Por Diferentes Métodos de Determinação. *Braz. J. Kinesiology Hum. Perform.* **2012**, *14*. [\[CrossRef\]](#)
35. Urhausen, A.; Coen, B.; Weiler, B.; Kindermann, W. Individual Anaerobic Threshold and Maximum Lactate Steady State. *Int. J. Sports Med.* **1993**, *14*, 134–139. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Aunola, S.; Rusko, H. Does Anaerobic Threshold Correlate with Maximal Lactate Steady-State? *J. Sports Sci.* **1992**, *10*, 309–323. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Smith, C.G.; Jones, A.M. The Relationship between Critical Velocity, Maximal Lactate Steady-State Velocity and Lactate Turnpoint Velocity in Runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2001**, *85*, 19–26. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
38. Hoogeveen, A.R.; Hoogsteen, J.; Schep, G. The Maximal Lactate Steady State in Elite Endurance Athletes. *Jpn. J. Physiol.* **1997**, *47*, 481–485. [\[CrossRef\]](#)
39. Sandbakk, Ø.; Pyne, D.B.; McGawley, K.; Foster, C.; Talsnes, R.K.; Solli, G.S.; Millet, G.P.; Seiler, S.; Laursen, P.B.; Haugen, T.; et al. The Evolution of World-Class Endurance Training: The Scientist's View on Current and Future Trends. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2023**, *18*, 885–889. [\[CrossRef\]](#)
40. Kaminsky, L.A.; Myers, J.; Arena, R. Determining Cardiorespiratory Fitness with Precision: Compendium of Findings from the FRIEND Registry. *Prog. Cardiovasc. Dis.* **2019**, *62*, 76–82. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
41. Pollock, M.L.; Feigenbaum, M.S.; Brechue, W.F. Exercise Prescription for Physical Fitness. *Quest* **1995**, *47*, 320–337. [\[CrossRef\]](#)
42. Roach, R.C.; Maes, D.; Sandoval, D.; Robergs, R.A.; Icenogle, M.; Hinghofer-Szalkay, H.; Lium, D.; Loeppky, J.A. Exercise Exacerbates Acute Mountain Sickness at Simulated High Altitude. *J. Appl. Physiol.* **2000**, *88*, 581–585. [\[CrossRef\]](#)
43. Michalik, K.; Smolarek, M.; Nowak, M.; Pueo, B.; Żmijewski, P. Intra-Reliability of a Wearable near-Infrared Sensor for Monitoring the Intensity of Exercise. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 5856. [\[CrossRef\]](#)
44. Tuesta, M.; Yáñez-Sepúlveda, R.; Verdugo-Marchese, H.; Mateluna, C.; Alvear-Ordenes, I. Near-Infrared Spectroscopy Used to Assess Physiological Muscle Adaptations in Exercise Clinical Trials: A Systematic Review. *Biology* **2022**, *11*, 1073. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Yoge, A.; Arnold, J.; Clarke, D.; Guenette, J.A.; Sporer, B.C.; Koehle, M.S. Comparing the Respiratory Compensation Point with Muscle Oxygen Saturation in Locomotor and Non-Locomotor Muscles Using Wearable NIRS Spectroscopy during Whole-Body Exercise. *Front. Physiol.* **2022**, *13*, 818733. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Price, S.; Wiecha, S.; Cieślinski, I.; Śliż, D.; Kasiak, P.S.; Lach, J.; Gruba, G.; Kowalski, T.; Mamcarz, A. Differences between Treadmill and Cycle Ergometer Cardiopulmonary Exercise Testing Results in Triathletes and Their Association with Body Composition and Body Mass Index. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 3557. [\[CrossRef\]](#)
47. Kowalski, T.; Sadowska, D.; Wiecha, S. Differences between Indoor and Outdoor Field Cycling Tests in Triathletes Are Associated with Training Environment History and BMI: Analysis and Prediction Formula. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2024**, *64*, 1039–1047. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Komisja Etyki Badań Naukowych

Instytut Sportu – Państwowy Instytut Badawczy
01-982 Warszawa, ul. Trylogii 2/16

Opinia o zgodności projektowanych badań naukowych z zasadami etycznymi

Komisja Etyki Badań Naukowych po zapoznaniu się z przedłożonym do oceny projektem badań naukowych pod tytułem:

Wyznaczenie zakresów intensywności obciążeń treningowych u zawodników podczas testów wysiłkowych w normoksji i hipoksji przy zastosowaniu pomiarów spektroskopii bliskiej podczerwieni (NIRS).

Realizowanym w:

**Instytut Sportu – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Fizjologii**

Pod kierownictwem:

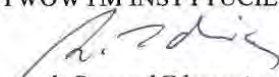
Kinga Rębiś, mgr nauk medycznych, nauk o zdrowiu oraz nauk o kulturze fizycznej

Stwierdza:

**Zgodność przedłożonego projektu z zasadami etyki badań naukowych
Aprobata KEBN-24-97-KR**

Warszawa, dnia 03.07.2024

PRZEWODNICZĄCY
KOMISJI ETYKI BADAŃ NAUKOWYCH
przy INSTYTUCIE SPORTU
PAŃSTWOWYM INSTYTUCIE BADAWCZYM


dr Ryszard Zdanowicz

Komisja Etyki Badań Naukowych

Instytut Sportu – Państwowy Instytut Badawczy
01-982 Warszawa, ul. Trylogii 2/16

Opinia o zgodności projektowanych badań naukowych z zasadami etycznymi

Komisja Etyki Badań Naukowych po zapoznaniu się z przedłożonym do oceny projektem badań naukowych pod tytułem:

Zastosowanie pomiarów spektroskopii bliskiej podczerwieni (NIRS) do monitorowania wysiłkowej reakcji układu mięśniowego zawodników.

Realizowanym w:

Instytut Sportu – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Fizjologii, Zakład Biochemii

Pod kierownictwem:

Kinga Rębiś, mgr nauk medycznych, nauk o zdrowiu oraz nauk o kulturze fizycznej

Stwierdza:

Zgodność przedłożonego projektu z zasadami etyki badań naukowych

Aprobata KEBN-22-71-KR

Warszawa, dnia 14.03.2022

PRZEWODNICZĄCY
KOMISJI ETYKI BADAŃ NAUKOWYCH
przy INSTYTUCIE SPORTU
PAŃSTWOWYM INSTYTUCIE BADAWCZYM



dr Ryszard Zdanowicz

ŻYCIORYS NAUKOWY

I. Artykuły naukowe opublikowane w czasopiśmie naukowym lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej

Lp.	Nazwa czasopisma	Tytuł artykułu	Punkty MEiN i IF
1.	Biology of Sport	The use of muscle near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess the aerobic training loads of world-class rowers	100 i 2,806
2.	Frontiers in Physiology	Usefulness of portable device to establish differences in muscle oxygenation between the Wingate test and graded exercise test: Effect of gender on anaerobic and aerobic capacity in speed skaters.	100 i 4,566
3.	Frontiers in Physiology	Respiratory muscle training induces additional stress and training load in well-trained triathletes—randomized controlled trial.	100 i 4,755
4.	Applied Sciences	Examining physiological changes during Counter-Strike: Global Offensive (CS:GO) performance in recreational male esports players.	100 i 2,500
5.	Journal of Clinical Medicine	Is the ventilatory efficiency in endurance athletes different?—	140 i 3,000

		Findings from the NOODLE study.	
6.	Frontiers in Physiology	Below or all the way to the peak? Oxygen uptake efficiency slope as the index of cardiorespiratory response to exercise—the NOODLE study.	100 i 3,200
7.	BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	Oxygen uptake efficiency plateau is unaffected by fitness level—the NOODLE study. BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation,	100 i 2,100
8.	Life (MDPI)	Comparative study of different respiratory muscle training methods: Effects on cardiopulmonary indices and athletic performance in elite short-track speedskaters.	70 i 3,200
9.	Journal of Clinical Medicine	Estimation of lactate thresholds, aerobic capacity and recovery rate from muscle oxygen saturation in highly trained speed skaters and healthy untrained individuals.	140 i 2,900
10.	Frontiers in Physiology	Body Oxygen Level Test (BOLT) is not associated with exercise performance in highly-trained individuals.	100 i 3,200
11.	BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	Influence of voluntary isocapnic hyperpnoea on recovery after high-intensity exercise in elite short-track speedskaters—randomized controlled trial.	100 i 2,100
12.	Sports (MDPI)	Transferability of exercise intensity based on muscle	20 i 2,900

		oxygenation from normoxia to hypoxia in ski-mountaineering athletes - exploratory study.	
13.	Biology of Sport	Optimizing recovery strategies in elite speedskating: A comparative analysis of different modalities.	140 i 5,000
14.	Journal of Functional Morphology and Kinesiology	Optimizing recovery strategies in elite speedskating: A comparative analysis of different modalities.	20 i 2,000
15.	European Journal of Applied Physiology	Critical power and critical oxygenation: Examining transferability between normoxia and hypoxia.	100 i 3,010
16.	European Journal of Applied Physiology	Haematological parameters and muscle oxygen saturation in elite male speed skaters during a 2-min time trial.	100 i 3,010
17.	Biology of Sport	Physiological and performance parameters associated with critical power decline in hypoxia among highly-trained endurance athletes.	140 i 5,000
18.	Experimental Physiology	Muscle oxygen saturation plateau: Definition and verification in different oxygen availability conditions in locomotor and non-locomotor muscles.	70 i 3,500
19.	Scientific Reports	Effectiveness of voluntary isocapnic hyperpnoea for mitigating hypoxemia and acute mountain sickness in normobaric hypoxia: A	140 i 3,800

		randomized crossover pilot trial.	
--	--	-----------------------------------	--

Suma IF = 62,547, MEiN = 1880

II. Monografie naukowe/rozdziały w monografiach naukowych wydanych przez wydawnictwo, które było ujęte w ministerialnym wykazie wydawnictw

Lp.	Tytuł monografii/ rozdziału w monografii (publikacji wieloautorskich)	Nazwa wydawnictwa	Uwagi

III. Konferencje naukowe krajowe i zagraniczne (należy wskazać, czy kandydat był osobą prezentującą)

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Starczewski M., **Rębiś K.** Evaluation of the maximal oxygen uptake and anaerobic threshold roller skiing field test in elite cross-country Paralympic skiers. Vista 2021 (online).

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Estimation of lactate thresholds for muscle oxygenation in healthy, non-training individuals and high-trained speed skaters. **Rębiś K.**, Klusiewicz, A., Długołęcka, B., Różański, P., Kowieski, K. 28th Annual ECSS Congress Paryż, Francja, 2023.

Plakat przygotowany na konferencję krajową: Perspektywy predykcji zależności wentylacji/produkcji dwutlenku węgla - badanie pilotażowe. Kasiak P., Śliż D., Kowalski T., **Rębiś K.**, Mamcarz A. XVI Konferencja Naukowa Sekcji Prewencji i Epidemiologii PTK – Kardiologia Prewencyjna. Kraków, Polska, 2023.

Wystąpienie na konferencji międzynarodowej: Respiratory muscle training induces additional stress and training load in well - trained athletes – randomized controlled trial. Kowalski T., **Rębiś K.**, Kasiak P., Klusiewicz A., Granda D., Wiecha S. Human Physiology Workshop. Cologne, Niemcy, 2023.

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Body Oxygen Level Test is not associated with athletic performance in highly-trained individuals. Kowalski T., Wilk A., **Rębiś K.**, Klusiewicz A., Wiecha S., Paleczny B. 29th Annual ECSS Congress Glasgow, Wielka Brytania, 2024

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Exploring the transferability of exercise intensity based on muscle oxygenation from normoxia to hypoxia: a reality check in ski-mountaineering athletes. **Rębiś K.**, Kowalski T., Klusiewicz A. 29th Annual **ECSS** Congress Glasgow, Wielka Brytania, 2024

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Muscle oxygen saturation remains stable during submaximal exercise across different hypoxic conditions in well-trained endurance athletes. Kowalski, T., **Rębiś, K.**, Wilk, A., Szwed, P., Klusiewicz, A., Faiss, R., Debevec, T. 30th Annual **ECSS** Congress, Rimini, Włochy, 2025.

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Is muscle oxygenation associated with haematological status in elite female speed skaters? Malczewska-Lenczowska, J., Klusiewicz, A., **Rębiś, K.**, Granda, D., Kowalski, T., Surała, O., Szczepańska, B. 30th Annual **ECSS** Congress, Rimini, Włochy, 2025.

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Bone Mineral Density and Nutritional Factors in Female Professional Triathletes. Granda D., Malczewska-Lenczowska J., Surała O., Szczepańska B., Kowalski T., **Rębiś K.** The Female Athlete Conference, Boston, USA, 2025.

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: Vitamin D status and premenstrual symptoms in professional female athletes. Granda D., Surała O., Crewther B. T., Malczewska-Lenczowska J., **Rębiś K.** Women in Sport Congress, Brisbane, Australia, 2026.

Plakat przygotowany na konferencję zagraniczną: The pre-competition taper can increase plasma cortisol and creatine kinase concentrations in young female weightlifters. **Rębiś K.**, Granda D., Crewther B. T., Turowski D., Obmiński Z. Women in Sport Congress, Brisbane, Australia, 2026. (**prezentacja plakatu podczas sesji posterowej**)

IV. Projekty naukowe (udział):

2025 Rozkład mocy w kolarstwie tandemowym - zależność między parametrami wydolności a efektywnością jazdy. Projekt badawczy Polskiego Związku Paralimpijskiego finansowany z funduszy Ministerstwa Sportu i Turystyki – Kierownik i główny wykonawca.

2025 Regeneracja powysiłkowa u zawodniczek i zawodników sportów drużynowych - własny projekt naukowy realizowany w Instytucie Sportu.

2024 Wyznaczanie mocy krytycznej (CP) w normoksji i hipoksji w oparciu o pomiary utlenowania mięśni (NIRS). Projekt badawczy Polskiego Związku Łyżwiarstwa Szybkiego finansowany z funduszy Ministerstwa Sportu i Turystyki – Kierownik i główny wykonawca.

2023 Wykorzystanie pomiarów spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS) do oceny intensywności wysiłku w warunkach hipoksji wysokościowej u narciarzy wysokogórskich. Projekt badawczy Polskiego Związku Alpinizmu – Kierownik i główny wykonawca.

2022 Diagnostyczna wartość pomiarów utlenowania mięśni (NIRS) do monitorowania obciążeń treningowych pływaków. Projekt badawczy Polskiego Związku Pływackiego finansowany z funduszy Ministerstwa Sportu i Turystyki – Kierownik i główny wykonawca.

2022 Szacowanie progu beztlenowego za pomocą pomiarów spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS) u zawodników dyscyplin wytrzymałościowych – własny projekt naukowy realizowany w Instytucie Sportu.

2022 Całkowita ilość hemoglobiny i stopień utlenowania mięśni a zdolność do pokonania symulowanego wysiłku u sportowców wybranych dyscyplin – uczestnictwo w zespole badawczym w projekcie naukowym realizowanym w Instytucie Sportu.

2021 Wielowymiarowa ocena odpowiedzi wysiłkowej łyżwiarzy szybkich. Projekt badawczy Polskiego Związku Łyżwiarstwa Szybkiego finansowany z funduszy MKDNIŚ – Główny wykonawca

2021 Dostosowanie ustawień rowerów szosowych i torowych oraz wzajemnej pozycji zawodników kolarstwa tandemowego pod względem aerodynamicznym. Projekt badawczy Polskiego Komitetu Paraolimpijskiego finansowany z funduszy MKDNIŚ – Główny wykonawca

2020 Monitorowanie obciążeń treningowych zawodników podnoszenia ciężarów z wykorzystaniem pomiarów spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS). Projekt badawczy Polskiego Związku Podnoszenia Ciężarów finansowany z funduszy Ministerstwa Sportu – Główny wykonawca

2020 Ewaluacja doboru elementów handbike'a i wyposażenia kolarza w celu minimalizacji sił oporu aerodynamicznego. Instytut Sportu-PIB. Projekt badawczy finansowany ze środków z funduszy Ministerstwa Sportu na podstawie umowy nr 2020/0555/0133/UDot/69/DSW – Główny wykonawca

V. Nagrody i wyróżnienia:

VI. Stypendia i granty:

Stypendium doktoranckie przyznane przez Radę Naukową IS-PIB

VII. Znajomość nowożytnych języków obcych: (certyfikat¹ lub dyplom ukończenia studiów, poświadczających znajomość nowożytnego języka obcego na poziomie biegłości językowej co najmniej B2)

Znajomość języka angielskiego – Poziom B2, potwierdzona w toku studiów

.....

/podpis kandydata/

¹ Wykaz certyfikatów uprawniających do zwolnienia z egzaminu z nowożytnego języka obcego - Załącznik nr 1 do [Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora](#) (Dz.U. 2018, poz. 261)